

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа – Инженерная школа энергетики

Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Отделение школы (НОЦ) – Отделение электроэнергетики и электротехники

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Регулируемый асинхронный электропривод для типовых производственных механизмов

УДК 62-83:621.65.053

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ71	Удуг Леонид Степанович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чернышев А.Ю.	к.т.н		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Подопригора И.В.	к.э.н		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Куликова О.А.	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Гарганеев А.Г.	д.т.н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Инженерная школа энергетики

Отделение электроэнергетики и электротехники

Код результата	Результат обучения
Универсальные компетенции	
P1	Совершенствовать и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, добиваться нравственного и физического совершенствования своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.
P2	Свободно пользоваться русским и иностранным языками как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности.
P3	Использовать на практике навыки и умения в организации научно-исследовательских и производственных работ, в управлении коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности.
P4	Использовать представление о методологических основах научного познания и творчества, роли научной информации в развитии науки, готовностью вести работу с привлечением современных информационных технологий, синтезировать и критически резюмировать информацию.
Профессиональные компетенции	
P5	Применять углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.
P6	Ставить и решать инновационные задачи инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности.
P7	Выполнять инженерные проекты с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического и электротехнического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.
P8	Проводить инновационные инженерные исследования в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.
P9	Проводить технико-экономическое обоснование проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.
P10	Проводить монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные работы электроэнергетического и электротехнического оборудования.
P11	Осваивать новое электроэнергетическое и электротехническое оборудование; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа – Инженерная школа энергетики

Направление подготовки – 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Отделение школы (НОЦ) – Отделение электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП

Гарганеев А.Г.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ **на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации
(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ71	Удуд Леониду Степановичу

Тема работы:

Регулируемый асинхронный электропривод для типовых производственных механизмов	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 3566/с от 07.05.2019 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2019
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Выпускная квалификационная работа бакалавра, техническая литература, техническая документация
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Титульный лист Задание Реферат Введение Раздел 1 Техническое описание конденсационной электростанции и конденсационного насоса; Выбор элементов силового канала электропривода; Разработка и исследование моделей электропривода. Раздел 2 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение Раздел 3 Социальная ответственность

	Заключение Список литературы
Перечень графического материала	– функциональная схема электропривода; – имитационная модель; – графики переходных процессов электропривода
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Основное исследование	Чернышев А.Ю.
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Подопригора И.В.
Социальная ответственность	Куликова О.А.
Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	01.02.2019

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чернышев А.Ю.	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ71	Удуг Л.С.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ71	Удуг Леониду Степановичу

Школа	ИШЭ	Отделение (НОЦ)	Электроэнергетика и электротехника
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника

Тема ВКР:

Регулируемый асинхронный электропривод для типовых производственных механизмов	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
6. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<p>Объект исследования: асинхронный электропривод с векторным управлением</p> <p>Методика: разработка, исследование</p> <p>Рабочая зона: закрытое помещение (цех)</p> <p>Область применения: линия по разливу в стеклотару</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
6.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	ГОСТ 23000-78. Система «человек-машина». Пульты управления. Общие эргономические требования; ГОСТ 21958-76. Система «человек-машина». Зал и кабины операторов. Взаимное расположение рабочих мест. Общие эргономические требования; Трудовой кодекс российской федерации.
6.2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	– повышенный уровень вибрации на рабочем месте – недостаточная освещенность – повышенная температура воздуха рабочей зоны – поражение электрическим током
6.3. Экологическая безопасность:	Защита окружающей среды возлагается на производство, при дальнейшем внедрении и применении данного метода.
6.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	– Наиболее вероятной ЧС при разработке и проверке асинхронного электро-привода является пожар

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
-----------	-----	------------------------	---------	------

Доцент	Куликова О.А.	к.т.н.		
--------	---------------	--------	--	--

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ71	Удуг Л.С.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ71	Удуг Леониду Степановичу

Школа	ИШЭ	Отделение школы (НОЦ)	Электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	- Проект выполняется в рамках выпускной квалификационной работы - В реализации проекта задействованы 2 человека: инженер, научный руководитель;
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	- Проект выполняется в соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» и ГОСТ Р 51541-99 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность» В соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» и ГОСТ Р 51541-99 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность» - Минимальный размер оплаты труда (на 2017 год) составляет 7800 руб.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	- Отчисления по страховым взносам – 28 % от ФОТ

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	- Потенциальные потребители результатов проекта - Анализ конкурентных технических проектных решений Оценка научно-технического уровня проекта (QuaD- технология)
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Формирование плана и графика разработки : -определение структуры работ; - определение трудоемкости работ; - разработка графика Ганта. Формирование бюджета затрат на научное исследование: - материальные затраты; -заработная плата (основная и дополнительная); - отчисления на социальные цели; - накладные расходы.

3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	- Определение ресурсной и экономической эффективности проекта Определение научно-технической эффективности
--	---

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. *Оценочная карта QuaD*
2. *График Ганта*

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Подопригора Игнат Валерьевич	Кандидат экономических наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ71	Удуд Леонид Степанович		

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация на тему «Асинхронный электропривод для типовых производственных механизмов» содержит 203 страницы печатного текста, 106 рисунков, 11 таблиц, 43 источника использованной литературы, 2 приложения.

Ключевые слова: электропривод, имитационная модель, структурная схема, функциональная схема. , асинхронный электродвигатель, преобразователь частоты, инвертор.

Цель работы: расчет электропривода и создание имитационных моделей.

Работа выполнена в программных средах: MATLAB Simulink, Mathcad и Microsoft Office.

В организационно – экономическом разделе выполнено планирование научно – исследовательских работ, рассчитан бюджет научного исследования.

В разделе производственная и экологическая безопасность рассмотрено влияние опасных и вредных производственных факторов на человека при эксплуатации разработанного электропривода.

Оглавление

Раздел 1. Введение.....	11
1.1. Классификация производственных машин и механизмов.....	12
1.2. Требования к регулируемому электроприводу общего назначения.....	13
1.3. Общая характеристика работы.....	18
Раздел 2. Функциональная схема асинхронного электропривода общего назначения с частотным векторным управлением и датчиком скорости.....	20
Раздел 3. Настройка и исследование контура тока асинхронного электропривода с частотным векторным управлением.....	32
Выводы к разделу 3.....	43
Раздел 4. Совместная работа контуров тока в системе векторного управления асинхронного электропривода.....	44
Выводы к разделу 4.....	57
Раздел 5. Настройка и исследование контура потокосцепления асинхронного электропривода с частотным векторным управлением.....	58
Выводы к разделу 5.....	74
Раздел 6. Настройка и исследование контура скорости асинхронного электропривода с частотным векторным управлением.....	75
Выводы к разделу 6.....	89
Раздел 7. Параметры элементов силового канала.....	91
Выводы к разделу 7.....	94
Раздел 8. Имитационные модели асинхронного регулируемого электропривода с частотным векторным управлением.....	95
Раздел 9. Имитационная модель однозонного асинхронного электропривода с частотным векторным управлением и двигателем RA200L4 мощностью 30 кВт.....	98
9.1. Расчет параметров настройки элементов модели электропривода.....	98
9.2. Исследование электропривода на имитационной модели.....	104
Общие выводы к разделу 9.....	111
Раздел 10. Имитационная модель однозонного асинхронного электропривода с частотным векторным управлением и двигателем АИР112МА6 мощностью 3 кВт.....	114
10.1. Расчет параметров настройки элементов модели электропривода.....	114
10.2. Исследование электропривода на имитационной модели.....	119
Общие выводы к разделу 10.....	129
Раздел 11. Бездатчиковый асинхронного электропривода с частотным векторным управлением.....	130

11.1. Бездатчиковый асинхронного электропривода с двигателем RA200L4 мощностью 30 кВт.....	130
11.2. Бездатчиковый асинхронного электропривода с двигателем АИР112МА6 мощностью 3 кВт.....	133
Выводы к разделу 11.....	137
Раздел 12. Двухзонный асинхронного электропривода с частотным векторным управлением.....	138
12.1. Выбор параметров формирователя потокосцепления ротора.....	138
12.2. Исследование электропривода на имитационной модели.....	139
Выводы к разделу 12.....	143
Раздел 13. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	144
Раздел 14. Социальная ответственность.....	160
Заключение.....	179
Список литературы.....	182
Приложение А.....	186
Приложение Б.....	187

Раздел 1. Введение

1.1. Классификация производственных машин и механизмов

Во всем многообразии современных производственных процессов можно выделить ряд технологических операций, характер которых является общим для различных производств. Рабочие машины и механизмы, выполняющие подобные операции универсальны и имеют общепромышленное применение. С другой стороны всё многообразие функциональных особенностей технологического оборудования можно свести к ограниченному числу типовых групп оборудования, которые характеризуются общностью выполняемых операций и принципом действия и для которых требуются однотипные функции управления и могут быть использованы типовые способы и средства их реализации.

Современное машинное производство характеризуется широким использованием механической работы для обеспечения силовых движений исполнительных органов рабочих машин. Основным источником механической энергии является электрический двигатель, преобразующий электрическую энергию в механическую энергию. А основным видом привода производственных механизмов рабочих машин – электрический привод, который к настоящему времени практически полностью вытеснил другие типы привода.

Современный электрический привод можно характеризовать как индивидуальный, регулируемый, автоматизированный и компьютеризированный. Электропривод решает все больше задач управления сложными взаимосвязанными перемещениями исполнительного органа рабочей машины, упрощая её конструкцию, улучшая характеристики и расширяя функциональные возможности. Однако роль электропривода не ограничивается ролью силового элемента рабочих машин. Функции, выполняемые электроприводом, непрерывно расширяются. В настоящее время регулируемые электроприводы широко используются в качестве средств регулирования технологических параметров. Электропривод стал важнейшим элементом автоматизированных систем управления технологических комплексов.

Регулировочные возможности и технические характеристики электропривода должны соответствовать техническим и технологическим требованиям и условиям эксплуатации конкретного производственного механизма. Однако, очевидно, что нецелесообразно создавать для каждого механизма функционально свой электропривод.

Более целесообразно разделить производственные механизмы по группам, с идентичными требованиями к электроприводу.

В соответствии с принципами классификации производственных механизмов, предложенными в [3] наиболее важными квалификационными признаками производственных машин и механизмов являются: назначение и соответствующее конструктивное исполнение, область применения и характер технологического процесса.

1. По назначению: подъемно-транспортные машины, землеройные машины, машины для транспортировки жидких сред и газов.

2. По области применения: машиностроительные, горные, металлургические, судовые, строительные.

3. По характеру технологического процесса можно разделить на две группы:

3.1. Механизмы непрерывного действия, технологический процесс которых имеет непрерывный характер.

3.1.1. Механизмы непрерывного действия с постоянной нагрузкой – конвейеры, эскалаторы, кольцевые канатные дороги, многокабинные подъемники, бумагоделательные машины, тяжелые металлорежущие станки.

3.1.2. Механизмы непрерывного действия с переменной нагрузкой:

- зависящей от скорости – центробежные насосы и вентиляторы, дымососы, компрессоры, центрифуги, механизмы главного движения токарных станков;

- зависящей от времени (обусловленной позиционной и ударной) – поршневые насосы и компрессоры, ткацкие станки, прессы, ковочные машины;

- зависимой от времени (случайной) – бурильные установки, шаровые мельницы, камнедробилки, сельскохозяйственные молотилки.

3.2. Механизмы циклического (прерывистого) действия, рабочий процесс которых состоит из повторяющихся однотипных циклов.

3.2.1. Механизмы циклического действия с реактивной нагрузкой – механизмы перемещения кранов, экскаваторов, металлорежущих станков, промышленных роботов, приводы валков прокатных станов, главные приводы строгальных станков, конвейеры циклического действия, маятниковые канатные дороги.

3.2.2. Механизмы циклического действия с активной нагрузкой – подъёмные механизмы кранов, экскаваторов, лифтов, шахтных подъемных машин, доменных печей.

Характер технологического процесса оказывает основное влияние на режимы работы электропривода и определяет главные требования, предъявляемые к нему в отношении мощности и перегрузочной способности, динамических качеств, необходимости и точности регулирования координат электромеханической системы, уровня автоматизации и т.п. Эти требования в какой-то степени зависят и от назначения установки, и от отрасли её применения, но определяются главным образом конкретным характером технологического процесса.

Основными задачами, решаемыми электроприводом типовых производственных механизмов, являются регулирование скорости перемещения или положения исполнительного органа, натяжение обрабатываемого материала и т. п. Общность решаемых задач для разных механизмов обусловила разработку и производство комплектных систем электропривода. Комплектный электропривод состоит из согласованных по своим техническим и конструктивным характеристикам составных элементов, узлов и устройств. Основным элементом комплектного электропривода является автоматизированный регулируемый электропривод. Массовым регулируемым электроприводом в настоящее время стал асинхронный электропривод с короткозамкнутым двигателем, инвертором напряжения и частотным векторным управлением.

1.2. Требования к регулируемому электроприводу общего назначения

Качественные характеристики регулируемого электропривода в полной мере определяют возможность реализации оптимальных режимов работы механического оборудования, обеспечения максимальной производительности и бесперебойной работы рабочей машины. Регулирование скорости, поддержание постоянства заданного значения скорости в установившихся режимах работы при изменении статического момента нагрузки и ограничение электрических и механических нагрузок допустимыми значениями является важнейшей функцией системы автоматического управления электропривода. Однако ограничения, накладываемые на электрические и механические нагрузки, всегда приводят к снижению производительности механизма. Максимальная производительность достижима только при эффективном использовании допустимых значений скорости, токов, моментов, усилий и ускорений во всех переходных процессах [6]. Это приводит к необходимости формирования оптимальных переходных процессов электропривода, обеспечивающих при наложенных ограничениях

максимум производительности механизма. Это особенно важно для электроприводов реверсивных механизмов, работающих в интенсивном повторно-кратковременном режиме.

На рисунок 1.1 приведена оптимальная диаграмма отработки заданного перемещения φ за минимальное время (задача на максимальное быстродействие) при наличии ограничений со стороны механической системы: скорости (первой производной от пути $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$), ускорения (первой производной от скорости $\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}$) и рывка (второй производной от скорости $\rho = \frac{d^2\omega}{dt^2}$).

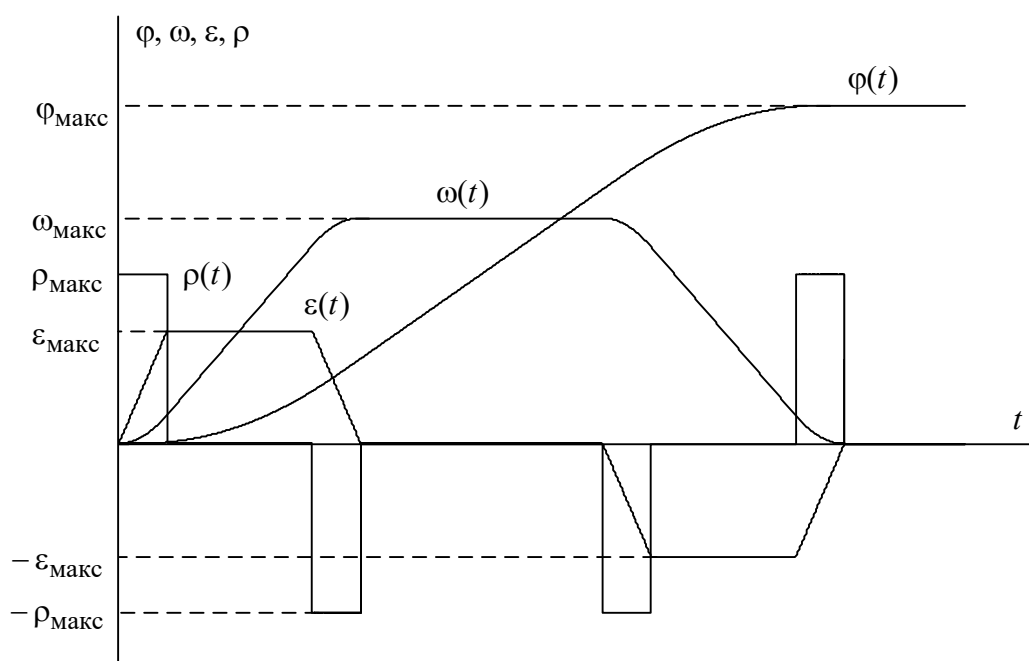


Рисунок 1.1 – Оптимальная диаграмма движения механизма при отработке заданного перемещения и ограничении механических динамических нагрузок

При выполнении оптимальной диаграммы движения механизма должны быть ограничены на уровне допустимых значений следующие

координаты электропривода: $\omega \leq \omega_{\text{макс}}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}; \quad \varepsilon \leq \varepsilon_{\text{макс}}, \frac{\text{рад}}{\text{с}^2};$

$\rho \leq \rho_{\text{макс}}, \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}.$

Указанные ограничения наложены со стороны механической системы и определены требованиями технологического процесса. Кроме того со стороны электрической системы всегда имеется ряд ограничений, которые определяются двигателем и преобразователем:

$\omega_{\text{дв.макс}}$ — максимальная допустимая скорость вращения двигателя;

$M_{\text{дв.макс}}$ — максимальный допустимый момент двигателя;

$I_{\text{эл.макс}}$ — максимальный допустимый ток двигателя или электрического преобразователя.

Элементы силового канала электрической системы должны выбираться при проектировании таким образом, что бы ограничения координат электрической системы не приводили к дополнительному ограничению координат механической системы.

Возможные пути выполнения ограничений координат электропривода рассмотрим при следующих условиях:

— система автоматического регулирования электропривода реализована по многоконтурной структуре подчиненного регулирования координат;

— механическая система электропривода представляет собой одностепенную систему.

Ограничение скорости. Ограничение скорости достигается ограничением задания на входе контура скорости (регулятора скорости) на уровне допустимого значения $\omega_{\text{зад}} = \omega_{\text{эл.макс}} \leq \omega_{\text{дв.макс}}$.

Ограничение тока. Ограничение тока достигается ограничением задания на входе контура тока (регулятора тока) на уровне значения максимально допустимого тока $I_{\text{зад}} = I_{\text{эл.макс}}$.

Ограничение момента двигателя. Ограничение момента двигателя достигается ограничением тока двигателя в соответствии с зависимостью

$$M_{\text{дв.макс}} = C_M(\Phi_{\text{дв}}) \cdot I_{\text{дв.макс}}, \quad \text{откуда} \quad I_{\text{зад}} = \frac{M_{\text{дв.макс}}}{C_M(\Phi_{\text{дв.факт}})}.$$

Ограничение ускорения. На основании основного уравнения движения электропривода с одностепенной механической системой

$$M_{\text{дв}} - M_{\text{с}} = J_{\text{э}} \cdot \frac{d\omega}{dt},$$

можно записать

$$\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_{\text{макс}} = \left(\frac{M_{\text{дв.макс}} - M_{\text{с}}}{J_{\text{э}}}\right), \quad \text{откуда} \quad \left(\frac{d\omega}{dt}\right)_{\text{макс}} = \frac{C_{\text{м}}(\Phi_{\text{дв}}) \cdot I_{\text{дв.макс}} - M_{\text{с}}}{J_{\text{э}}}$$

Ограничение ускорения может быть достигнуто регулированием тока двигателя, но требует знания значений потока двигателя, статического момента нагрузки и момента инерции электропривода

$$I_{\text{зад}} = f\left[\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_{\text{макс}}, \Phi_{\text{дв.факт}}, M_{\text{с факт}}, J_{\text{э факт}}\right].$$

Более целесообразно формировать линейное задание скорости $\omega_{\text{зад}}(t) = \varepsilon_{\text{макс}} \cdot t$ на входе контура скорости, тогда система управления электропривода будет поддерживать заданное значение производной скорости вне зависимости от параметров механической системы и потока двигателя.

Ограничение рывка. Приняв $M_{\text{с}} = 0$, $J_{\text{э}} = \text{const}$, и продифференцировав основное уравнение движения электропривода, получим зависимость рывка от производной момента и далее тока двигателя:

$$\left(\frac{d^2\omega}{dt^2}\right)_{\text{макс}} = \frac{1}{J_{\text{э}}} \cdot \left(\frac{dM_{\text{дв}}}{dt}\right)_{\text{макс}}; \quad \left(\frac{d^2\omega}{dt^2}\right)_{\text{макс}} = \frac{C_{\text{м}}(\Phi_{\text{дв}})}{J_{\text{э}}} \cdot \left(\frac{dI_{\text{дв}}}{dt}\right)_{\text{макс}}.$$

Ограничение рывка может быть достигнуто регулированием производной тока двигателя

$$\left(\frac{dI_{\text{дв}}}{dt}\right)_{\text{зад}} = f\left[\left(\frac{d^2\omega}{dt^2}\right)_{\text{макс}}, \Phi_{\text{дв.факт}}, M_{\text{с факт}}, J_{\text{э факт}}\right],$$

но требует знания значений потока двигателя, статического момента нагрузки и момента инерции электропривода

Более целесообразно формировать задание скорости $\omega_{\text{зад}}(t) = \rho_{\text{макс}} \cdot \frac{t^2}{2}$ на входе контура скорости, тогда система управления электропривода будет поддерживать заданное значение рывка вне зависимости от параметров механической системы и потока двигателя.

Формирование задания скорости с заданными ограничениями скорости, ускорения и рывка осуществляются с помощью задатчика интенсивности скорости (ЗИС) с S-образной выходной характеристикой. Задатчик интенсивности скорости устанавливается на входе контура регулирования скорости. При ступенчатом задании скорости задатчик формирует на входе контура скорости плавно

изменяющееся задание $\omega_{\text{зад}}(t)$ с заданными значениями установившейся скорости $\omega_{\text{уст}} = \omega_{\text{зад}}$, максимального допустимого рывка $\rho_{1\text{макс}}$, $\rho_{3\text{макс}}$ и ускорения $\varepsilon_{\text{макс}}$, форма которого показана на рисунок 1.2. Временные интервалы предельной диаграммы ($\omega_{\text{зад}} = \omega_{\text{дв.макс}}$) выходного сигнала задатчика связаны с наложенными ограничениями координат привода, следующими соотношениями:

$$t_1 = \frac{\varepsilon_{\text{макс}}}{\rho_{1\text{макс}}}; \quad t_3 = \frac{\varepsilon_{\text{макс}}}{\rho_{3\text{макс}}}; \quad t_2 = \frac{\omega_{\text{макс}}}{\varepsilon_{\text{макс}}} - \frac{t_1 + t_3}{2}.$$

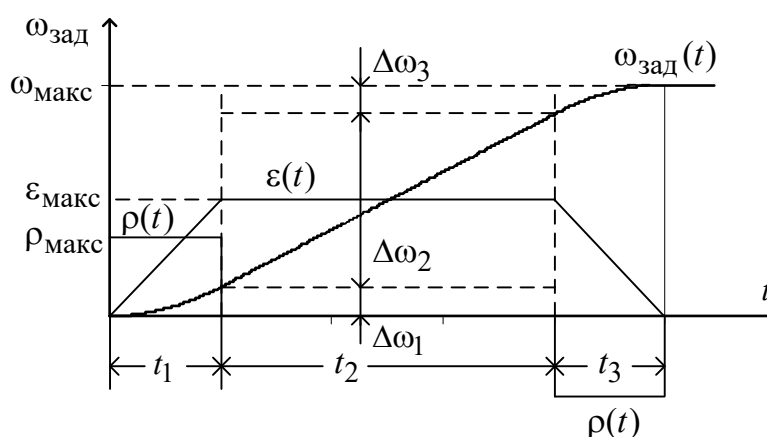


Рисунок 1.2 – Предельная выходная характеристика S-образного задатчика интенсивности скорости

Электропривод с задатчиком интенсивности скорости с S-образной выходной характеристикой на входе и замкнутой системой подчиненного регулирования координат формирует переходные процессы с заданными значениями рывка и ускорения вне зависимости от фактических значений параметров механической системы (момента инерции и момента нагрузки). Однако это возможно только при условии, что момент, ток и скорость изменения тока двигателя не достигают предельных значений, наложенных со стороны электрической системы электропривода. Для этого параметры траектории движения и ограничения координат электропривода должны соответствовать следующим условиям:

$$t_1 > \frac{I_{\text{дв.макс}}}{\left(\frac{di}{dt}\right)_{\text{макс}}}; \quad t_3 > \frac{I_{\text{дв.макс}}}{\left(\frac{di}{dt}\right)_{\text{макс}}};$$

$$t_2 + \frac{t_1 + t_3}{2} > \frac{\omega_{\text{макс}} \cdot J_{\text{э макс}}}{M_{\text{дв. макс}} - M_{\text{с макс}}} ;$$

$$t_2 + \frac{t_1 + t_3}{2} > \frac{\omega_{\text{макс}} \cdot J_{\text{э макс}}}{C_{\text{м}}(\Phi_{\text{дв}}) \cdot I_{\text{дв. макс}} - M_{\text{с макс}}} ,$$

где $\left(\frac{di}{dt}\right)_{\text{макс}}$ – максимальная скорость изменения тока двигателя,

зависящая от параметров силовой цепи электрического преобразователя и настройки контура тока. В асинхронном электроприводе момент двигателя определяется составляющей тока I_q двухфазной эквивалентной модели трехфазного двигателя.

1.3. Общая характеристика работы

Актуальность работы. Задача модернизации существующих производств с устаревшими технологиями и оборудованием, создание современных производств с автоматизированными технологическими процессами требуют разработки и массового производства систем регулируемого электропривода и прежде всего общего назначения.

Цели работы. 1. Используя предложенные в работах [20, 21] принцип построения функциональных и структурных схем и методику расчета параметров настройки многоконтурных систем автоматического регулирования асинхронных электроприводов с частотным векторным управлением, оценить возможность их практического применения и внести требуемые изменения и дополнения с учетом цифровой реализации систем управления современных электроприводов с квантованием сигналов по уровню и времени:

- выбрать способ компенсации зависимости настройки регуляторов тока от изменений напряжения звена постоянного тока преобразователя;
- определить алгоритм совместной работы двух регуляторов тока в режимах регулирования и ограничения тока инвертора;
- выбрать наиболее рациональный тип наблюдателя потока двигателя для электропривода общего назначения и определить требования к его реализации;
- выбрать типовой ПИ-регулятора для многоконтурной структуры системы регулирования электропривода;

- оценить возможности импульсного датчика скорости и определить требования к его характеристикам;
- оценить предельные характеристики электропривода при питании от промышленной сети и условия полного использования двигателя по моменту и скорости;
- сформулировать базовые положения методики расчета параметров настройки систем управления асинхронных электроприводов с частотным векторным управлением общего назначения;

2. Разработать в среде Matlab + Simulink модели цифровых систем регулируемого асинхронного электропривода с частотным векторным управлением общего назначения для широкой группы общепромышленных и типовых производственных механизмов: однозонного и двухзонного регулирования скорости, без датчика потока двигателя, с датчиком и без датчика скорости двигателя. Имитационные модели электроприводов должны обеспечивать достоверность расчетов процессов в аналоговых элементах силовой части электропривода с учетом дискретности управления ключами инвертора и в элементах цифровой системы автоматического управления электропривода, работающих с временными интервалами квантования, равными или кратными периоду ШИМ инвертора.

3. Произвести проверку работоспособности предложенных функциональных и структурных схем и методики расчета параметров настройки систем автоматического регулирования асинхронных электроприводов с частотным векторным управлением на примерах электроприводов с двигателями общего назначения без встроенных датчиков потока и питания от промышленной сети напряжением $U_c = 3 \times 380_{-15\%}^{+10\%}$ В.

4. Исследовать работу асинхронного электропривода с цифровыми системами частотного векторного управления на моделях и оценить зависимость их показателей качества работы от напряжения сети, параметров функциональных элементов и параметров настройки.

Методы исследования. Для решения поставленных задач применяются теоретические и экспериментальные методы исследований. При теоретических исследованиях использованы: теория автоматического регулирования, теория электрических машин, электрического электропривода и преобразователей чистоты, математические модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, методы компьютерного математического моделирования.

Раздел 2. Функциональная схема асинхронного электропривода общего назначения с частотным векторным управлением и датчиком скорости

В массовом электроприводе переменного тока используются трехфазные асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором и трехфазные преобразователи частоты со звеном постоянного тока и инвертором напряжения.

Для реализации системы управления асинхронного электропривода с частотным векторным управлением используется структурная схема асинхронного двигателя во вращающейся двухфазной системе координат d, q , ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора $\Psi_{2d} = |\Psi_2|$ (рисунок 2.1). Такая модель двухфазного асинхронного двигателя позволяет оперировать не синусоидальными по форме, а постоянными величинами токов, напряжений и потокосцеплений, значения которых равны амплитудным значениям синусоидальных токов, напряжений и потокосцеплений двухфазного и трехфазного двигателя в неподвижной системе координат.

Если внутренние перекрестные связи в структурной схеме рисунка 2.1 не учитывать или в дальнейшем компенсировать, то структурная схема двигателя во вращающейся двухфазной системе координат d, q упрощается (рисунок 2.2) и оказывается подобной двигателю постоянного тока с независимой обмоткой возбуждения и весьма удобной для реализации системы управления координатами асинхронного двигателя. В этом случае электродвигатель как объект управления имеет два управляющих воздействия U_{1d} , U_{1q} и пять регулируемых координат двигателя: фазные токи I_{1d} , I_{1q} и потокосцепление ротора Ψ_{2d} двухфазного двигателя, электромагнитный момент $M_{\text{дв эм}}$ и угловая скорость вращения $\omega_{\text{дв}}$ трехфазного двигателя.

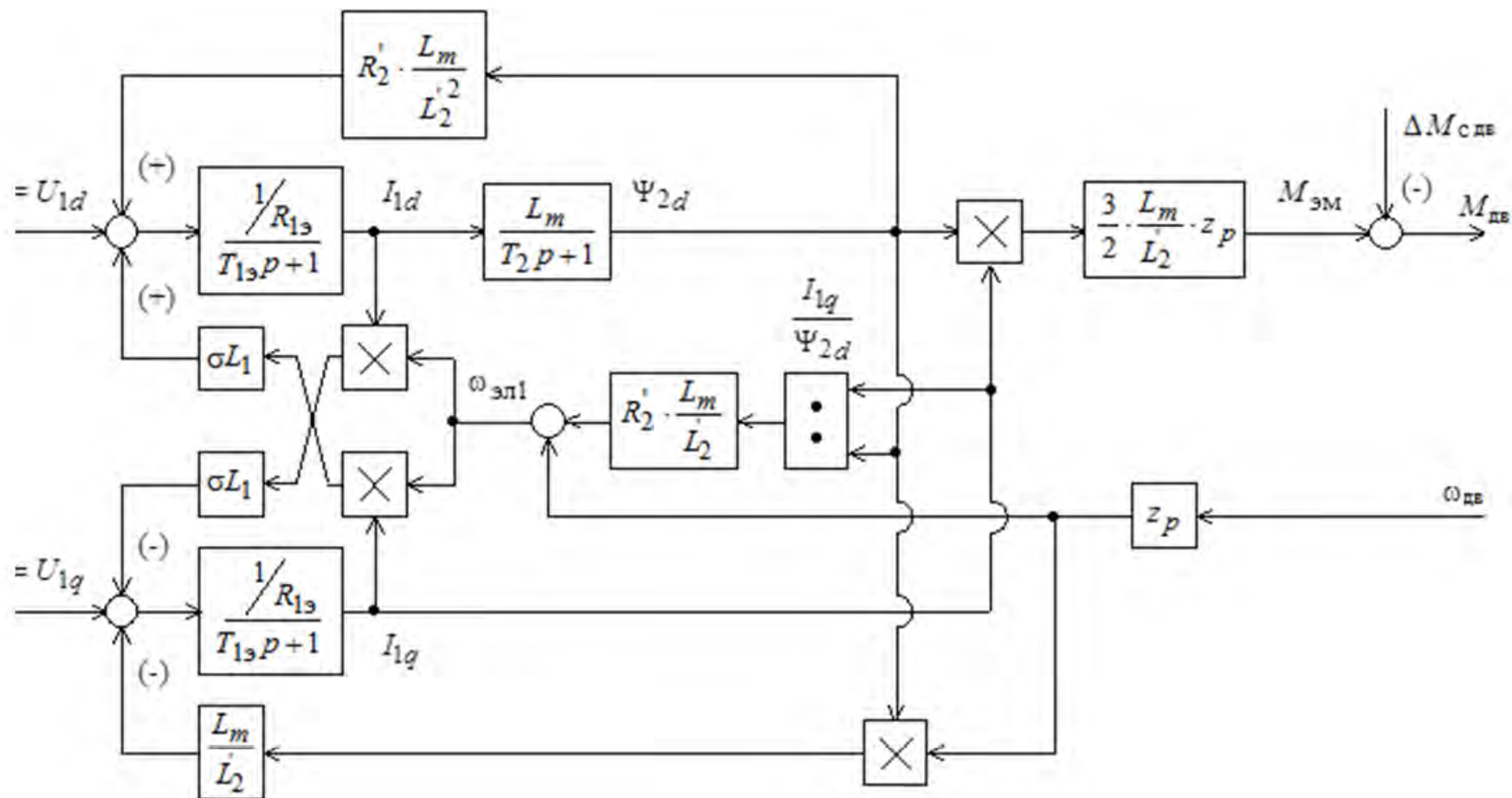


Рисунок 2.1 – Полная структурная схема асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором
во вращающейся системе координат d, q

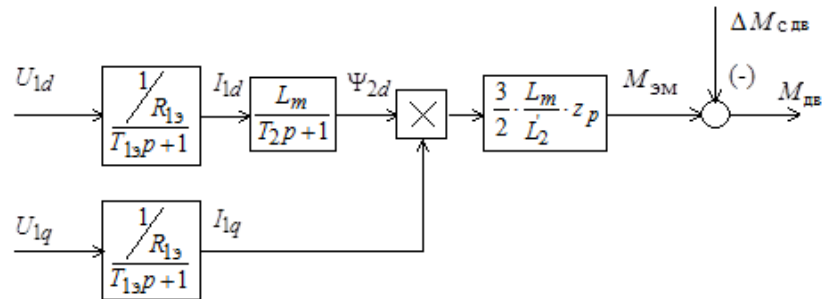


Рисунок 2.2 – Структурная схема двигателя с компенсированными внутренними обратными связями

Упрощенная схема преобразователя частоты со звеном постоянного тока и инвертором напряжения приведена на рисунке 2.3. Фильтр LC обеспечивает сглаживание пульсаций напряжения с выхода выпрямителя. Конденсатор C и обратные диоды обеспечивают обмен реактивной энергией между двигателем и звеном постоянного тока. Чаще всего используется простейшая и экономичная схема преобразователя с неуправляемым выпрямителем $UZ1$. Напряжение на выходе инвертора в этом случае может регулироваться только за счет широтно-импульсного регулирования в инверторе.

Рекуперация энергии в сеть в таком преобразователе принципиально невозможна. Энергия, запасенная в движущихся частях электропривода, при торможении сбрасывается в тормозной резистор через открытый в это время транзисторный ключ VT . Тормозной ключ управляется в функции значения напряжения на конденсаторе C . При превышении напряжением на конденсаторе C максимально допустимого уровня ключ открывается, и конденсатор разряжается на тормозной резистор R_T . Излишки энергии рассеиваются в виде тепла. Такое решение достаточно для электроприводов с редкими пусками, а также для электроприводов с управлением от задатчиков интенсивности скорости, когда торможение двигателей осуществляется без возврата энергии.

В электроприводах механизмов с активной нагрузкой (например, подъемные лебедки, транспортные механизмы, работающие на спуск и т. д.) желательно обеспечить рекуперацию энергии в сеть. Для осуществления возврата энергии в сеть преобразователь частоты с неуправляемым выпрямителем дополнительно должен быть укомплектован блоком рекуперации. Блок рекуперации представляет собой управляемый выпрямитель, который в тормозном режиме двигателя работает как инвертор, ведомый сетью.

Основные достоинства преобразователя частоты с инвертором напряжения:

- практически синусоидальный ток нагрузки;
- широкий диапазон выходных частот (практически от 0 Гц до 1000 Гц);

Недостатки преобразователя частоты с инвертором напряжения:

- большие требуемые значения емкости фильтра C ;
- трудности обеспечения рекуперации энергии в сеть.

Преобразователи частоты с инвертором напряжения, предназначенные для электроприводов, обеспечивают регулирование частоты в диапазоне от 0 Гц до $2 \cdot f_{1H}$ Гц и перегрузку по току $(1.5 \div 1.6) \cdot I_{1H}$.

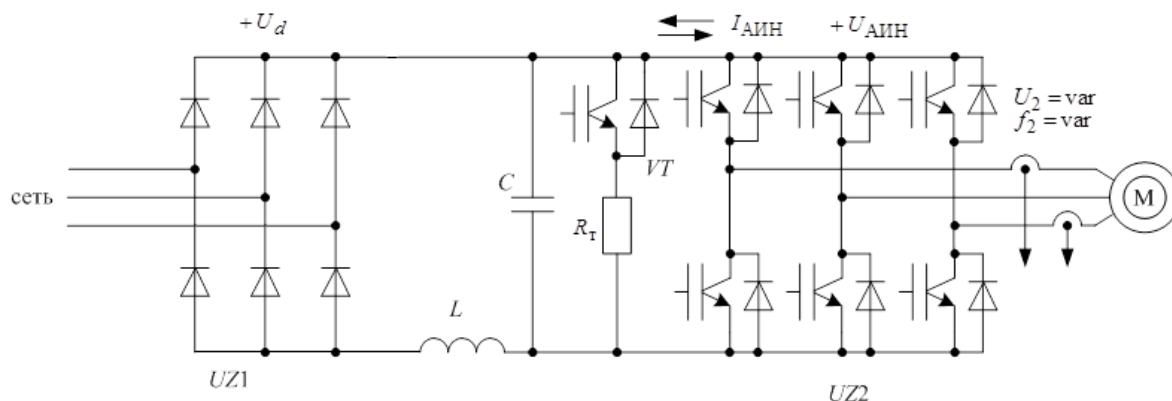


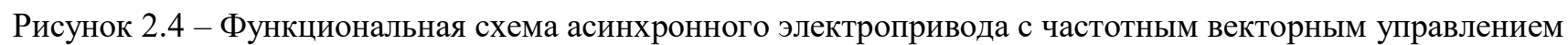
Рисунок 2.3 – Преобразователь частоты со звеном постоянного тока и инвертором напряжения

Функциональная схема асинхронного электропривода с частотным векторным управлением, приведена на рисунке 2.4. Система автоматического регулирования электропривода реализована в соответствии с структурной схемой двигателя рисунка 2.2 по многоконтурной структуре с подчиненным регулированием координат, содержит двухконтурную систему автоматического регулирования потока (САР потока) и двухконтурную систему автоматического регулирования скорости (САР скорости) двигателя. Четыре контура регулирования: токов I_{1d} , I_{1q} (электромагнитного момента $M_{эм}$) и потокосцепления ротора Ψ_{2d} двухфазного двигателя и скорости вращения двигателя $\omega_{дв}$ имеют индивидуальные ПИ-регуляторы. Сформированные регуляторами токов управления двухфазным двигателем во вращающейся системе координат d, q (рисунок 2.2) последовательно преобразуются в управления двухфазным двигателем в

неподвижной системе координат α , β (рисунок 2.5), а затем трехфазным инвертором, питающим трехфазный асинхронный двигатель.

Система управления инвертором представляет собой трехфазную синусоидальную или векторную ШИМ с введением в управляющие воздействия третьей гармоники. Коррекция управляющих сигналов инвертором в зависимости от напряжения звена постоянного тока осуществляется схемой U_d -корректора. Управление скоростью осуществляется от задатчика интенсивности скорости (ЗИС), установленного на входе системы управления электропривода.

В системе электропривода асинхронный двигатель и механическая система как объект управления представляют собой непрерывную систему, преобразователь частоты является дискретным устройством с периодом управления $T_{\text{ШИМ}}$, а система управления электропривода – цифровой.



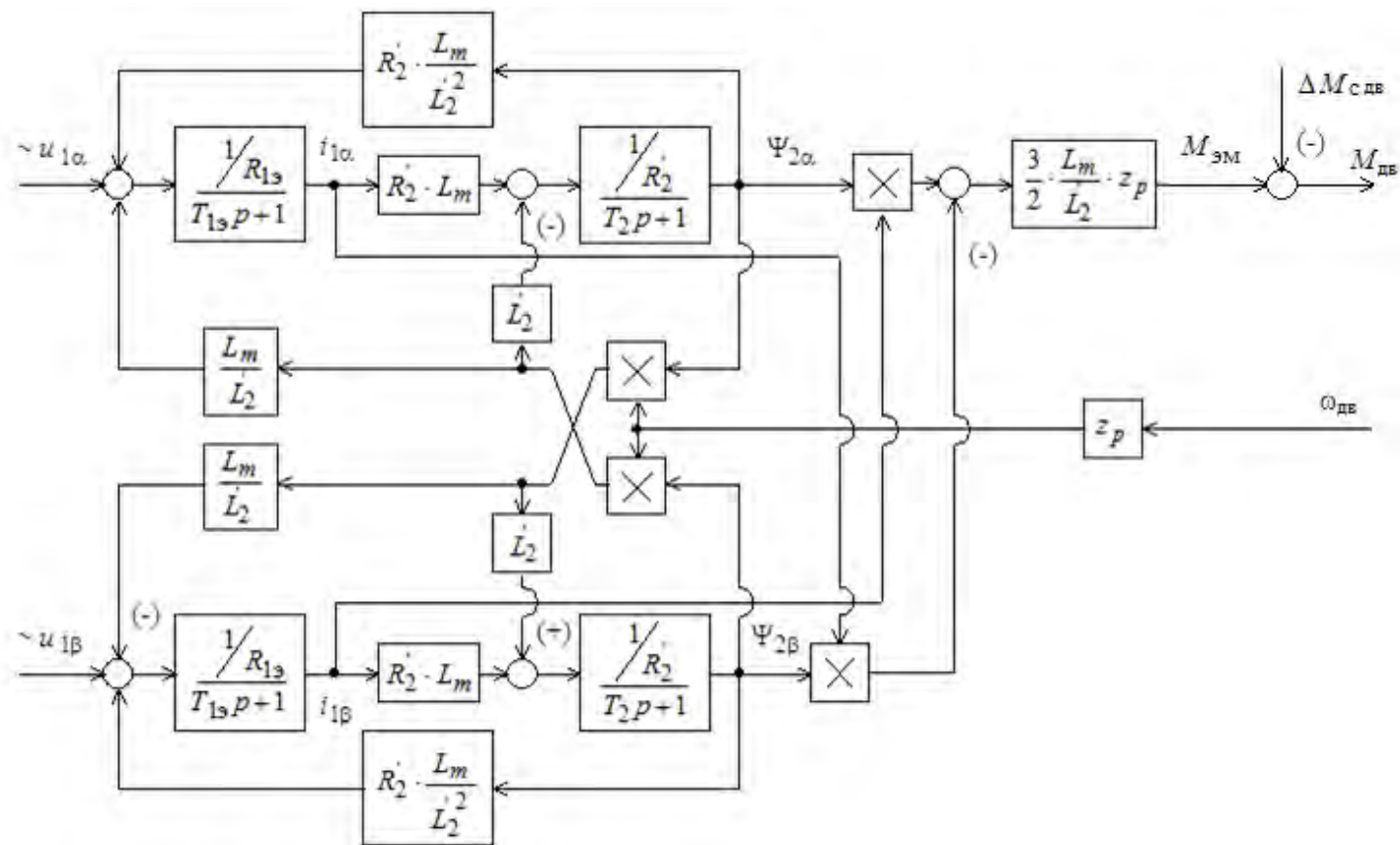


Рисунок 2.5 – Структурная схема двухфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат статора α, β

В цифровой системе управления электропривода расчет управлений осуществляется с квантованием по времени, измерение координат – с квантованием по времени и уровню. Измерение токов, скорости, измерение или расчет потокосцепления двигателя осуществляется за временной интервал квантования в цепи обратной связи T_{oc} , а расчет управлений – за временной интервал квантования в прямом канале контура $T_{пк}$. Управление инвертором преобразователя осуществляется с задержкой на интервал времени $T_{зу.и}$.

Квантование по уровню при измерении токов двух фаз и потоков в зазоре двигателя по осям α , β определяется разрядностью АЦП $n_{ацп}$ аналоговых датчиков, а при измерении скорости – разрядностью АЦП аналогового датчика скорости или числом импульсов на оборот датчика угловых перемещений $n_{им.дп}$.

Электропривод принципиально позволяет обеспечить:

- использование большого практического опыта применения многоконтурных структур с подчиненным регулированием координат в системах управления электроприводов постоянного тока;
- типовые настройки контуров регулирования с индивидуальными ПИ-регуляторами токов I_{1d} и I_{1q} , потокосцепления ротора Ψ_{2d} и скорости вращения двигателя $\omega_{дв}$ и обеспечить регулирование управляемых координат электропривода с технически оптимальными показателями качества;
- работу электродвигателя в четырех квадрантах в пусковых и тормозных режимах и в длительном режиме работы с переменным статическим моментом нагрузки реактивного и активного характера;
- ограничение регулируемых координат электропривода на уровне их допустимых значений (максимального тока преобразователя или двигателя, момента и скорости вращения двигателя, динамического момента, ускорения и рывка в переходных режимах работы;

- плавное регулирование скорости и в широких пределах;
- организацию двухзонного регулирования скорости с постоянным значением ослабленного потока или с управляемым в функции скорости ослаблением потока во второй зоне регулирования;
- реализацию систем автоматизированного электропривода, работающих в режимах моментного, позиционного и следящего электропривода.;
- работу с аналоговыми датчиками потока двигателя и без них;
- работу с аналоговым датчиком скорости и с импульсным датчиком перемещений в качестве датчика скорости;
- в режиме работы с редкими пусками и остановами сброс кинетической и потенциальной энергии, запасенной соответственно в движущихся или поднятых массах, в тормозной резистор;
- в повторно-кратковременном режиме работы и в тормозном режиме работы с активным моментом нагрузки возможность применения дополнительного блока рекуперации энергии в сеть.

Справочные и расчетные параметра электродвигателя

$P_{\text{дв.н}}$ – номинальная мощность на валу, кВт;

n_0 – синхронная скорость вращения, об/мин.

$U_{1\text{фн}}$ – номинальное фазное напряжение, В;

$I_{1\text{фн}}$ – номинальный фазный ток, А;

$n_{\text{дв.н}}$ – номинальная скорость вращения, об/мин.

$\eta_{\text{н}}$ – к.п.д. при номинальной нагрузке;

$\cos\varphi_{\text{н}}$ – коэффициент мощности при номинальной нагрузке;

$I_{\text{п}} / I_{\text{н}}$ – кратность пускового тока;

$M_{\text{п}} / M_{\text{н}}$ – кратность пускового момента;

$M_{\text{макс}} / M_{\text{н}}$ – кратность максимального момента;

$J_{\text{дв}}$ – момент инерции, кг · м²

z_p – число пар полюсов;

$s_{\text{н}}$ – номинальное скольжение;

$s_{\text{к}}$ – критическое скольжение;

$\omega_{\text{дв.н}}$ – номинальная угловая скорость вращения, рад/с;

$M_{\text{дв.н}}$ – номинальный момент на валу, Н·м;

$M_{\text{эм.н}}$ – номинальный электромагнитный момент, Н·м;

$\Delta M_{\text{с дв}}$ – момент трения двигателя, Н·м;

I_0 – ток холостого хода, А;

$\Psi_{2\text{н}}$ – номинальное потокосцепление ротора, Вб.

Расчетные параметры схемы замещения двигателя [2.5, 2.6]:

R_1 – активное сопротивление обмотки статора, Ом;

R_2' – приведенное к обмотке статора активное сопротивление обмотки ротора, Ом;

$L_{1\sigma}$ – индуктивность обмотки статора, обусловленная потоком рассеяния, Гн;

$L_{2\sigma}'$ – приведенная к обмотке статора индуктивность обмотки ротора, обусловленная потоком рассеяния, Гн;

L_m – результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре, создаваемым суммарным действием токов статора (индуктивность контура намагничивания), Гн.

Расчетные параметры структурных схем двигателя:

$L_1 = L_{1\sigma} + L_m$ – эквивалентная индуктивность обмотки статора, Гн;

$L_2' = L_{2\sigma}' + L_m$ – эквивалентная индуктивность обмотки ротора, Гн;

$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2'}$ – коэффициент рассеяния магнитного поля;

$R_{1\varphi} = R_1 + R_2' \cdot \frac{L_m^2}{L_2'^2}$ – эквивалентное активное сопротивление цепи статора, Ом;

$T_{1\varphi} = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_{1\varphi}}$ и $T_2 = \frac{L_2'}{R_2'}$ – электромагнитные постоянные времени цепи статора и ротора, с.

Параметры сети

Трехфазная сеть $U_c = 380_{-15\%}^{+10\%}$ В:

$U_{\text{сн}} = 380$ В, $U_{\text{смин}} = 323$ В и $U_{\text{смакс}} = 418$ В – номинальное, минимальное и максимальное напряжение сети.

Справочные и расчетные параметры преобразователя

$I_{\text{пч.н}}$ – номинальный ток нагрузки, А;

$I_{\text{пч.макс}}$ – ток перегрузки, А;

$f_{\text{ШИМ}}$ – частота ШИМ (коммутации) инвертора, Гц.

$T_{\text{ШИМ}} = \frac{1}{f_{\text{ШИМ}}}$ – период ШИМ, с;

$I_{\text{пч.длит.доп}}$ – длительно допустимый ток при выбранном значении частоты коммутации, А;

$U_{\text{и}}$ – выходное напряжение инвертора, В;

U_d – напряжение звена постоянного тока, В.

Заданные и расчетные параметры электропривода

$n_{\text{эп.макс}}$ – максимальная скорость электропривода (двигателя), об/мин.

$\omega_{\text{эп.макс}}$ – максимальная угловая скорость электропривода, рад/с;

$\Delta M_{\text{с мех}}$, $M_{\text{ср}}$, $M_{\text{сА}}$ и $M_{\text{с}}(t)$ – приведенный к валу двигателя статический момент механизма: трения, реактивный, активный и зависимый от времени, Н·м;

$M_{\text{эп.макс}}$ – максимальный момент электропривода (на валу двигателя), Н·м;

$M_{\text{эм.макс}}$ – максимальный электромагнитный момент электродвигателя, Н·м;

$I_{\text{эп.макс}} = I_{\text{лф макс}}$ – максимальный фазный ток (действующее значение) электродвигателя, А;

$J_{\text{э}}$, $J_{\text{дв}}$ и $J_{\text{мех}}$ – приведенный к валу двигателя эквивалентный момент инерции механической системы, двигателя и механизма, кг·м²;

$$k_{J_{\text{мех}}} = \frac{J_{\text{мех.макс}} - J_{\text{мех.макс}}}{M_{\text{с макс}}}, \text{ кг} \cdot \text{м}^2 / \text{Н} \cdot \text{м}$$

– коэффициент изменения момента инерции механизма при изменении момента статической нагрузки.

Справочные параметры асинхронного электродвигателя и преобразователя частоты находятся в [21, 32 – 34] и в интернетресурсах, расчетные параметры, схемы замещения и структурных схем двигателя рассчитываются по методике, изложенной в [20, 21, 23] с помощью программы REP_AD_RL2.

Параметры структурных схем асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором во вращающейся системе координат d, q (рисунок 2.1) и в неподвижной системе координат α, β (рисунок 2.4) используется при расчете параметров настройки системы управления и реализации наблюдателя потока. В этих случаях параметры моделей должны учитывать сопротивления соединительных проводов двигателя $R_{\text{пров}}$.

Схема набора базовой имитационной модели асинхронного электропривода с частотно-векторным управлением приведена на рисунке 2.6

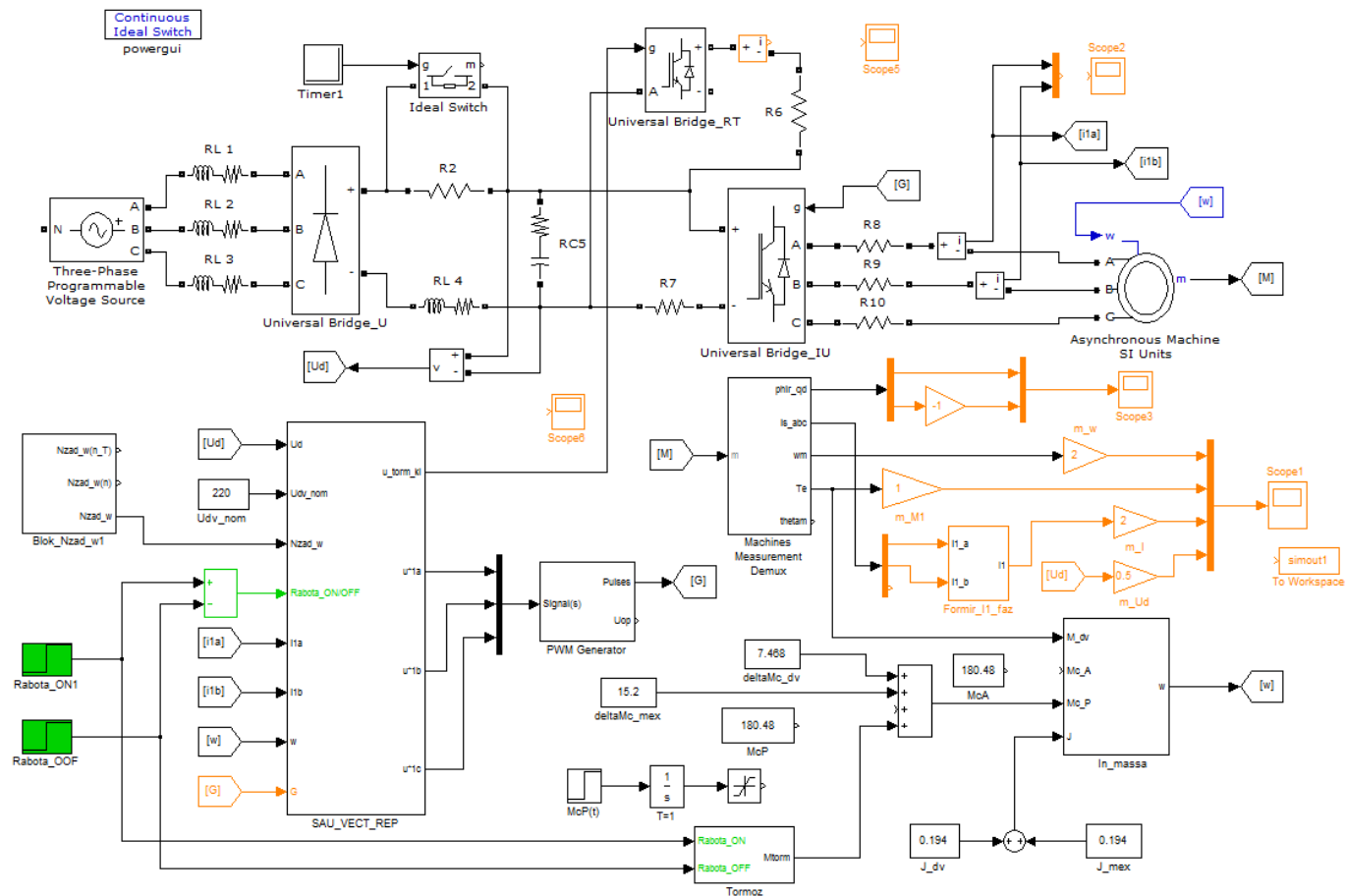


Рисунок 2.6 – Схема набора базовой имитационной модели асинхронного электропривода с частотным векторным управлением

Раздел 3. Настройка и исследование контура тока асинхронного электропривода с частотным векторным управлением

Предельное быстродействие систем асинхронного электропривода с частотным векторным управлением полностью определяется быстродействием инвертора напряжения в составе преобразователя частоты и внутреннего контура тока системы управления электропривода. В современном транзисторном инверторе напряжения используется широтно-импульсный способ формирования и регулирования частоты и амплитуды основной гармоники выходного напряжения преобразователя. Система управления инвертором обеспечивает коммутацию ключей инвертора с высокой постоянной частотой $f_{\text{ШИМ}}$ и периодом $T_{\text{ШИМ}}$ широтно-импульсной модуляции (ШИМ) выходного напряжения.

Управления инвертором формируются ПИ-регуляторами контуров тока I_{1d}, I_{1q} двухфазной модели асинхронного двигателя во вращающейся системе координат d, q . В цифровом контуре тока все операции выполняются последовательно на интервале реального времени $t_{\text{расч}}$, который составляет значительную часть периода ШИМ. Это в свою очередь определяет квантованный по времени характер расчетных значений на выходе регуляторов тока. По этим причинам при настройке контура тока необходимо стремиться обеспечить следующие условия:

- принять равными временные интервалы квантования сигналов в прямом канале $T_{\text{ПК.Т}}$ и в цепи обратной связи $T_{\text{ОС.Т}}$ контура тока $T_{\text{ПК.Т}} = T_{\text{ОС.Т}} = T_{\text{к.т}}$;

- принять значение временного интервала квантования сигналов обратной связи и управления в контуре тока $T_{\text{к.т}} = T_{\text{ШИМ}}$ или для достижения предельного быстродействия электропривода $T_{\text{к.т}} = 0.5 \cdot T_{\text{ШИМ}}$;

- измерение токов двигателя осуществлять с интервалом оцифровки

АЦП датчика тока $T_{\text{к.дт}} = T_{\text{к.т}}$;

- вычисление токов двухфазной модели асинхронного двигателя I_{1d}, I_{1q} , расчет регуляторов тока и расчет управлений двухфазным двигателем u_{1d} и u_{1q} осуществлять непосредственно после обновления управлений на входе контуров тока и далее оставлять полученные значения неизменными на протяжении всего временного интервала квантования сигналов $T_{\text{к.т}}$ в контуре;

- обновление управлений ключами инвертора осуществлять непосредственно после расчета регуляторов тока с минимальной временной задержкой $T_{\text{зу.и}}$.

Примечание. Общие условия настройки контура тока: $T_{\text{пк.т}} \geq T_{\text{шим}}$;
 $T_{\text{ос.т}} \leq T_{\text{пк.т}}$; $T_{\text{к.дт}} \leq T_{\text{ос.т}}$; $T_{\text{к.т}} = T_{\text{пк.т}}$.

На рисунке 3.1 приведены два варианта управления ключами стойки фазы *A* трехфазного инвертора, соответствующие выбору длительности интервала квантования регулятора тока $T_{\text{к.т}} = T_{\text{шим}}$ и $T_{\text{к.т}} = 0.5 \cdot T_{\text{шим}}$.

Цифровые регуляторы тока формируют выходные сигналы на временном интервале $T_{\text{к.т}}$ с расчетом интегральной составляющей, соответствующей всей длительности интервала, т. е. с опережением относительно пропорциональной составляющей (рисунок 3.2)

$$N_{\text{рті}} = N_{i-1}^{\text{и}} + (N_i^{\text{п}} + \Delta N_i^{\text{и}}) = N_{i-1}^{\text{и}} + k_{\text{рег}} \cdot N_{\text{вх}i} \cdot \left(1 + \frac{T_{\text{к.т}}}{T_{\text{рег}}}\right).$$

В результате сигналы регуляторов тока квантованы с интервалом времени $T_{\text{к.т}}$, но не синхронизированы с периодом ШИМ инвертора. Поэтому далее управления двухфазным двигателем $u_{1d} = N_{\text{рtd}}$ и $u_{1q} = N_{\text{ртq}}$ синхронизируются с периодом ШИМ и в результате оказываются с временной задержкой $T_{\text{з.и}}$ относительно выходных сигналов регуляторов. Если обновление управлений на входе контура тока синхронизировано с периодом ШИМ инвертора, такая задержка происходит на целый интервал квантования $T_{\text{з.и}} = T_{\text{к.т}}$. На рисунке 3.2 стрелками показаны моменты времени измерения токов двигателя.

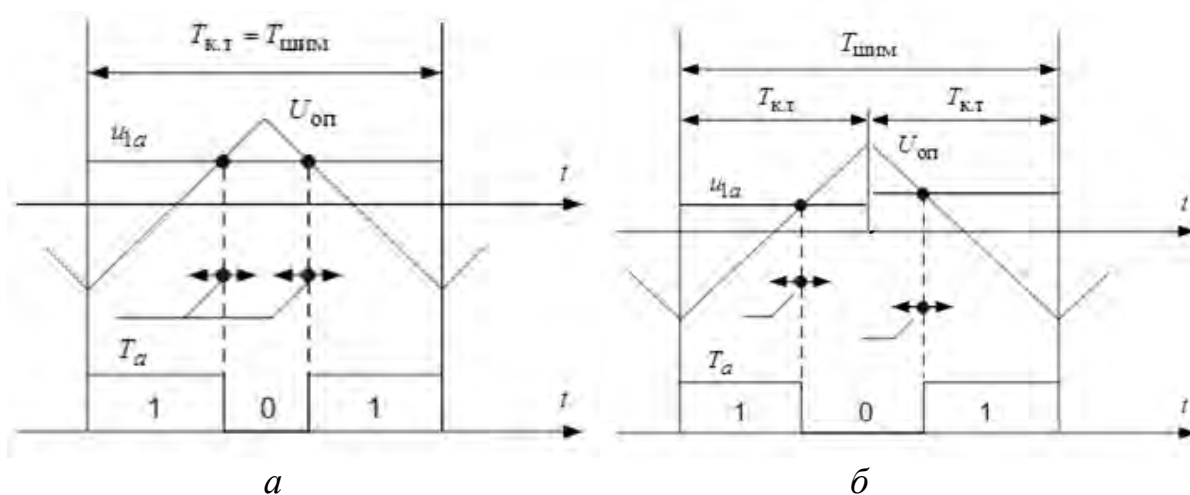


Рисунок 3.1. Управление ключами стойки фазы *A* инвертора:
a – при выборе $T_{\text{к.т}} = T_{\text{шим}}$; *б* – при выборе $T_{\text{к.т}} = 0.5 \cdot T_{\text{шим}}$

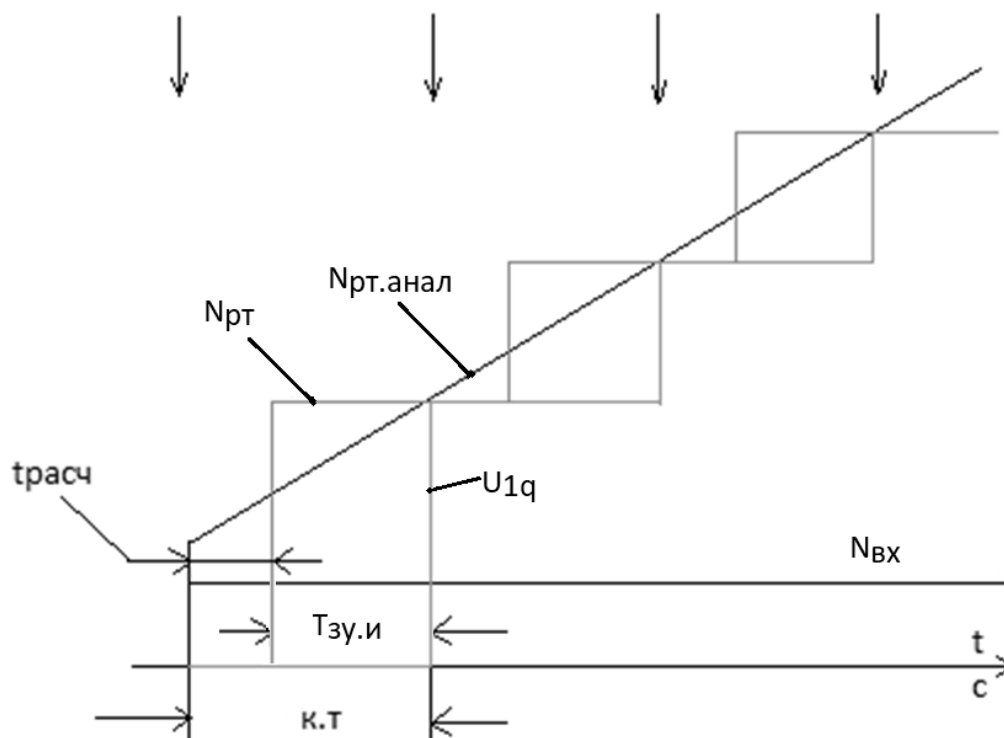


Рисунок 3.2. Формирование управлений двухфазным двигателем в контуре тока

Регуляторы тока могут быть реализованы по схемам цифровых ПИ-регуляторов с ограничением выходного сигнала и отключением (рисунок 3.3, а) или управлением (рисунок 3.3, б) интегральной составляющей в режиме насыщения регулятора. В первом случае при насыщении регулятора интегрирование прекращается на втором временном интервале расчета $T_{к.т}$. Интегральная составляющая, рассчитанная на первом интервале

$$N^и = N_{вх i=1} \cdot k_{рег} \cdot \frac{T_{к.т}}{T_{рег}},$$

остается неизменной до момента выхода регулятора из насыщения.

Во втором случае, начиная со второго временного интервала режима насыщения регулятора, осуществляется коррекция (управление) начального значения интегральной составляющей. Коэффициент коррекции $k_{кор}$ находится при настройке регулятора из условия равенства интегральной составляющей в момент выхода из насыщения требуемому значению выходного сигнала в установившемся режиме работы. При отсутствии насыщения работа регуляторов идентична.

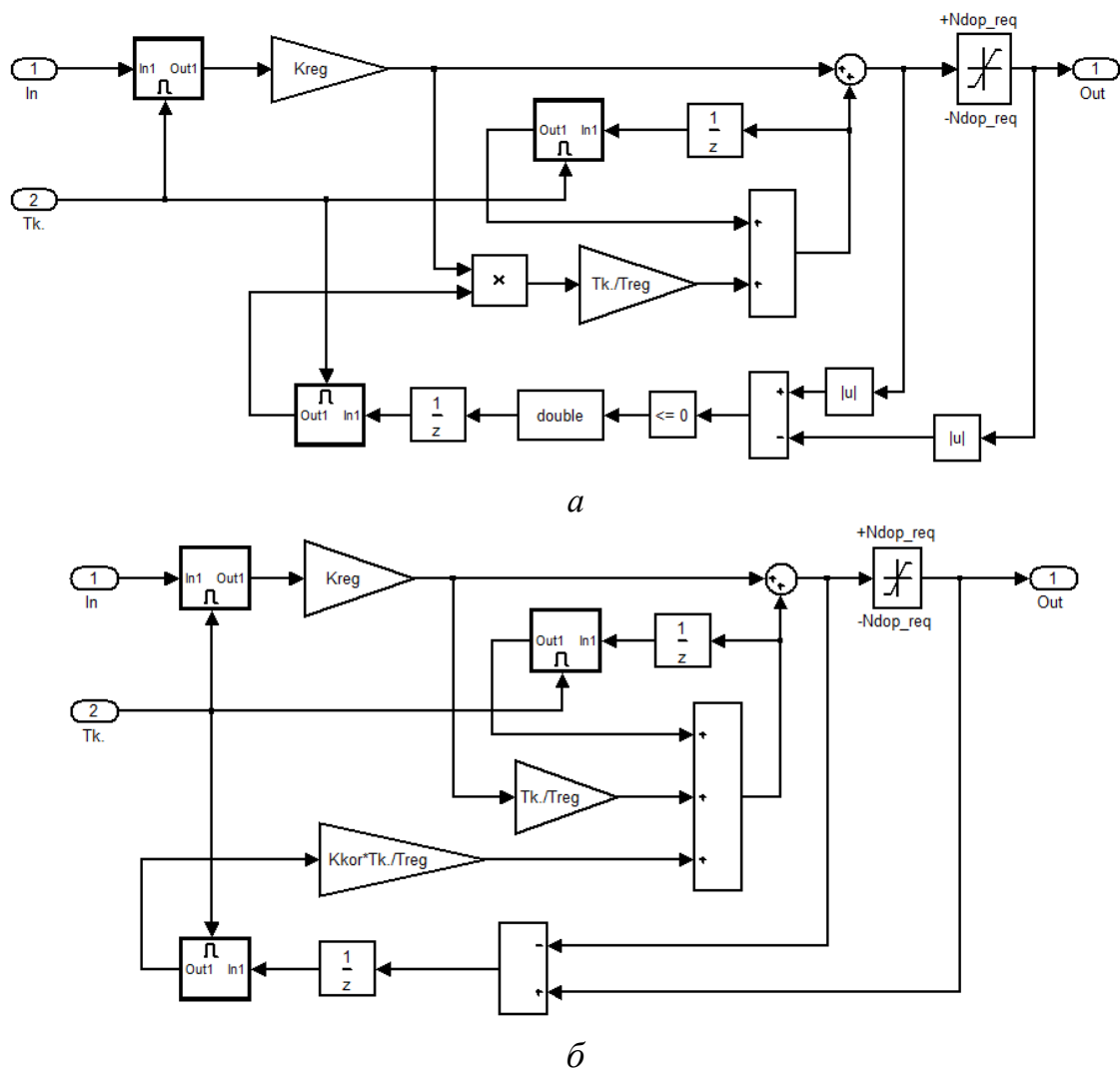


Рисунок 3.3. Схемы цифровых ПИ-регуляторов с постоянным ограничением выходного сигнала и отключением (а) или управлением (б) интегральной составляющей в режиме насыщения

Исследования контура тока проводились в составе асинхронного электропривода с частотным векторным управлением. Модель электропривода разработана для электродвигателя АИР90L4 ($P_H = 2.2$ кВт, $n_H = 1500$ об/мин, $I_H = 5$ А) в соответствии с рекомендациями, приведенными в [20, 21], и учитывает широтно-импульсную модуляцию выходного напряжения инвертора с частотой $f_{\text{ШИМ}} = 5000$ Гц. Функциональная схема контура тока I_{1q} приведена на рисунке 3.4. Регулятор тока был реализован по схемам рисунка 3.3. При моделировании управление регулятора рассчитывается на первом малом шаге расчета $\Delta t = 1 \cdot 10^{-6}$ с, что соответствует $t_{\text{расч}} = 0$. Звено запаздывания, включенное после регулятора тока, обеспечивает временную задержку $T_{\text{зу.и}} = T_{\text{к.т}}$ формирования

управления двухфазным двигателем u_{1q} . Угол поворота координатной системы $\varphi_{\text{КС}}$ снят с модели двигателя без учета квантования по времени и уровню. Моделирование проводилось с малым шагом расчета $\Delta t = 1 \cdot 10^{-6}$ с.

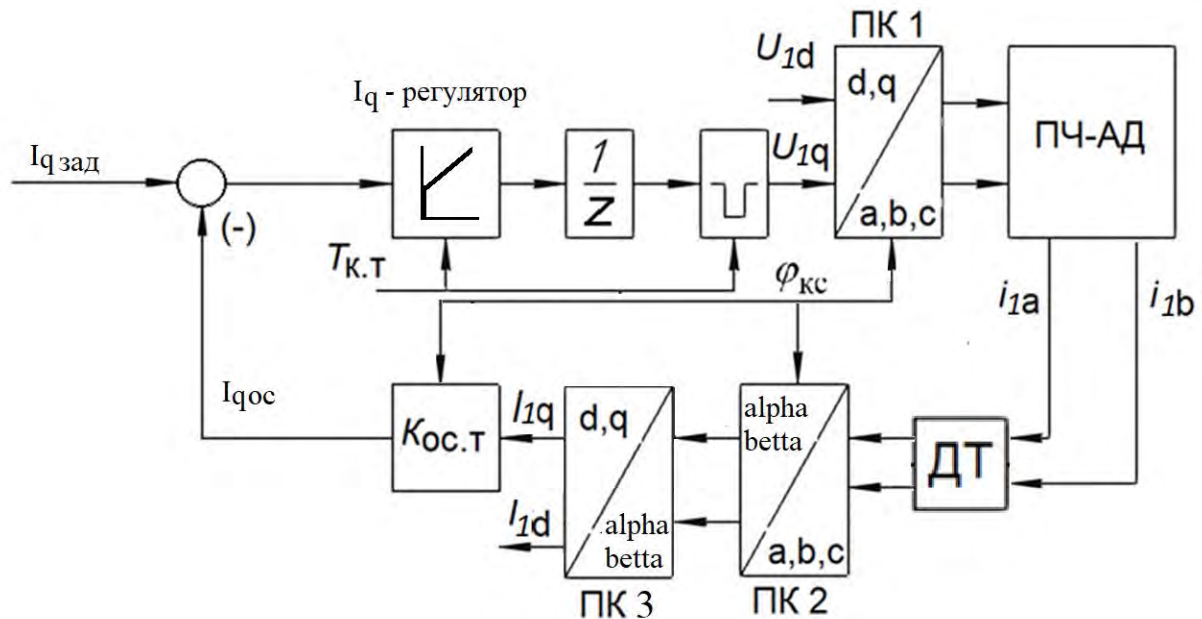


Рисунок 3.4. Функциональная схема контура тока I_{1q}

Исходные параметры для расчета настроек контура тока: $f_{\text{ШИМ}}$ – частота ШИМ инвертора; $U_{1\text{фн}}$ – номинальное фазное напряжение двигателя, В; $I_{1\text{фмакс}}$ – максимальный фазный ток двигателя в режимах пуска и торможения, А; эквивалентное сопротивление $R_{1\text{э}}$ и постоянная времени $T_{1\text{э}}$ цепи статора двигателя (см. рисунок 2.1 в разделе 2) должны быть определены с учетом сопротивления соединительных проводов, соответственно, $R_{1\text{э}}^*$, Ом и $T_{1\text{э}}^*$, с; $n_{\text{АЦПДТ}}$ – разрядность АЦП датчика тока; $T_{\text{к.дт}}$ – временной интервал оцифровки АЦП датчика тока.

Последовательность расчета параметров настройки контура тока:

– коэффициент передачи преобразователя частоты при выборе максимального значения модуля вектора управления инвертором $\text{mod } u_{1\text{макс}} = 1$ (см. раздел 4)

$$k_{\text{пр}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{иф макс}};$$

– максимальное измеряемое значение тока

$$I_{\text{изм.макс}} \geq (1.1 \div 1.2) \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1\text{ф макс}}, \text{ А};$$

– коэффициент передачи датчика тока

$$k_{\text{дт}} = \frac{0.5 \cdot 2^{n_{\text{ацп дт}}}}{I_{\text{изм.макс}}}, \text{ 1/А};$$

– масштабирующий коэффициент преобразования выходного сигнала датчика тока

$$k_{i \text{ дт}} = \frac{I_{\text{изм.макс}}}{0.5 \cdot 2^{n_{\text{ацп дт}}}} = 1/k_{\text{дт}}, \text{ А};$$

– коэффициент согласования сигнала обратной связи на входе регулятора тока

$$k_{\text{ос.т}} = \frac{N_{\text{ос.т макс}}}{I_{\text{изм.макс}}},$$

где $N_{\text{ос.т макс}}$ – максимальное значение сигнала обратной связи, задается в абсолютных, например $N_{\text{ос.т макс}} = I_{\text{изм.макс}}$, или относительных, например $N_{\text{ос.т макс}} = 1$, единицах;

– коэффициент обратной связи по току

$$k_{\text{т}} = \frac{N_{\text{ос.т макс}}}{I_{\text{изм.макс}}};$$

– максимальное значение задания тока на входе контура

$$N_{\text{зт. макс}} = k_{\text{т}} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1\text{ф макс}};$$

– эквивалентная малая постоянная времени контура тока

$$T_{\text{мтэ}} = n_{\text{т}} \cdot \frac{T_{\text{к.т}}}{2} + T_{\text{зу.и}} + T_{\text{ф.от}},$$

где $T_{\text{ф.от}}$ – постоянная времени аналоговых фильтров в цепи датчиков тока;

– постоянная времени регулятора тока

$$T_{\text{рт}} = T_{1\text{э}}^*, \text{ с};$$

– коэффициент усиления регулятора тока

$$k_{\text{рт}} = \frac{T_{1\text{э}}^* \cdot R_{1\text{э}}^*}{k_{\text{пр}} \cdot k_{\text{т}} \cdot 2 \cdot T_{\text{мтэ}}}.$$

Выходной сигнал регулятора тока в общем случае должен быть ограничен значением $N_{\text{рт макс}} = \pm 1$.

Ожидаемое качество работы контура тока по управлению предварительно может быть оценено следующими показателями[20, 22]:

- статическая ошибка $\Delta I_{ст} = 0$;
- перерегулирование при обработке ступенчатого сигнала зависит от настройки контура, но не превышает 10% при максимальном быстродействии;
- скоростная ошибка при обработке линейно изменяющегося сигнала

$$\Delta I_{ск} = 2 \cdot T_{мтэ} \cdot \left(\frac{di}{dt} \right)_{зад}, \text{ А};$$

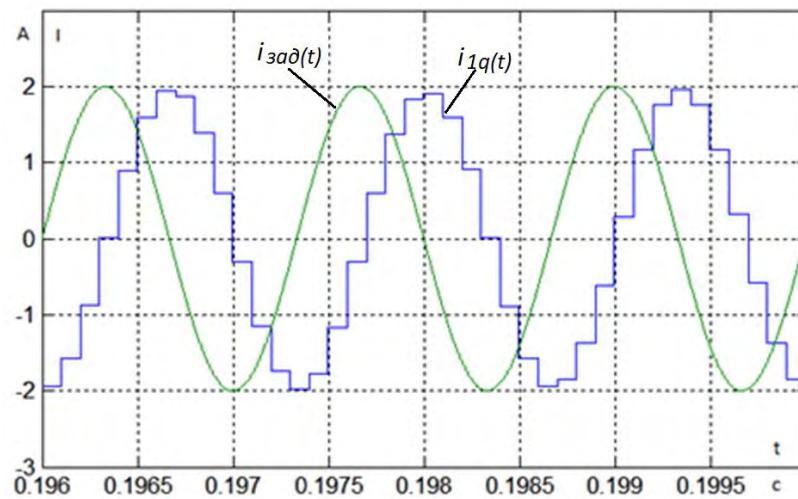
- полоса пропускания при обработке синусоидального сигнала

$$\omega_{п} \geq \frac{0.71}{T_{мтэ}}, \text{ рад/с} \quad \text{или} \quad f_{п} \geq \frac{0.71}{2\pi \cdot T_{мтэ}}, \text{ Гц}.$$

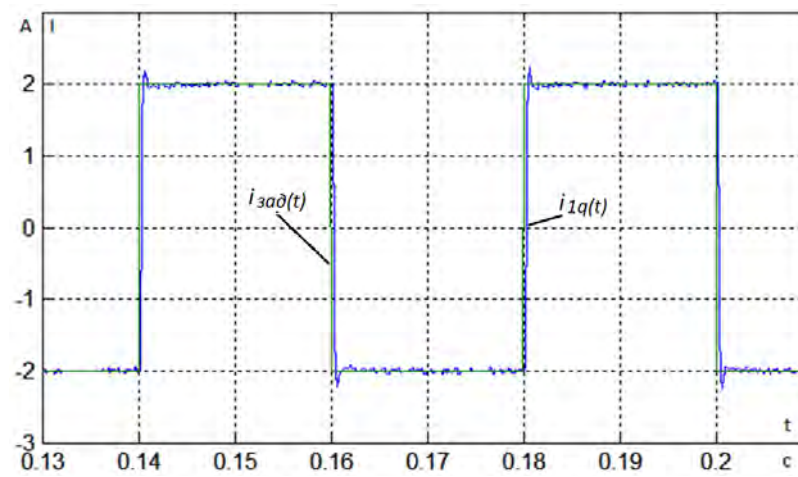
Исследования контура тока I_{1q} проводились при разрядности АЦП датчика тока $n_{ацпдт} = 10$, работающем контуре потокосцепления, номинальном потоке и заторможенном двигателе. В процессе компьютерных исследований рассматривалась обработка контуром тока входных сигналов с прямоугольной, синусоидальной $i_{зад}(t) = i_{зад} \cdot \sin(2\pi \cdot f_y \cdot t)$ и линейно нарастающей $i_{зад}(t) = \left(\frac{di}{dt} \right)_{зад} \cdot t$ формой, при следующих настройках:

$T_{к.т} = 0.5 \cdot T_{шим}$, $n_T = 1$; $T_{к.т} = T_{шим}$ и значениях коэффициентов $n_T = 1$, $n_T = 2$, $n_T = 3$ и $n_T = 4$.

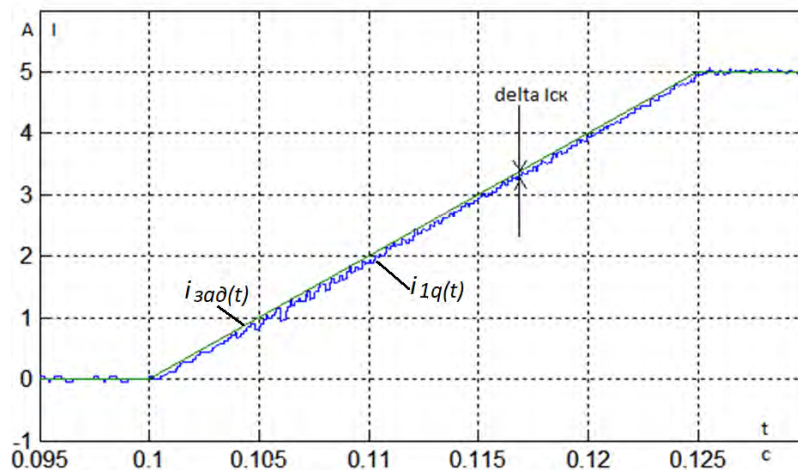
На рисунках 3.5 и 3.6 в качестве иллюстрации приведены диаграммы заданного $i_{зад}(t)$ и фактического $i_{1q}(t)$ тока, полученные в результате обработки синусоидального, ступенчатого и линейного входного сигнала контуром тока для двух случаев настройки: $T_{к.т} = 0.5 \cdot T_{шим}$, $n_T = 1$ и $T_{к.т} = T_{шим}$, $n_T = 3$.



a

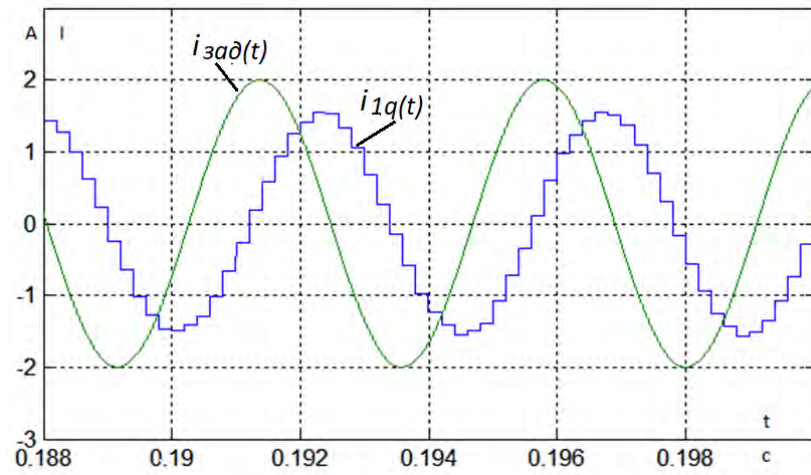


б

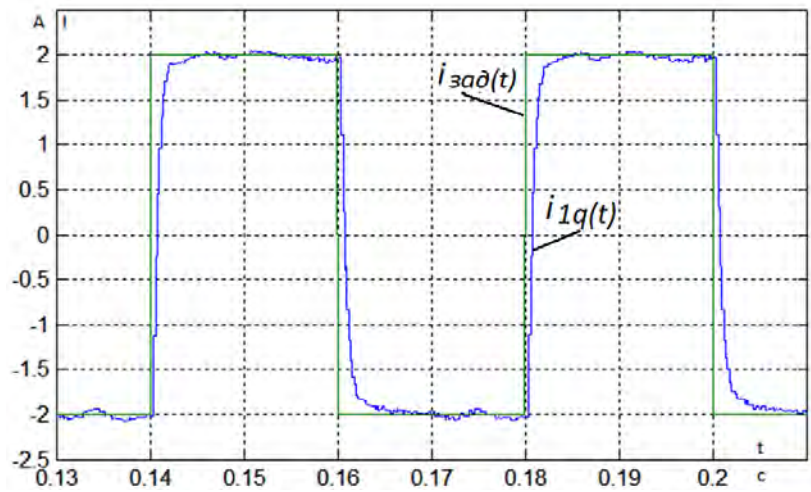


в

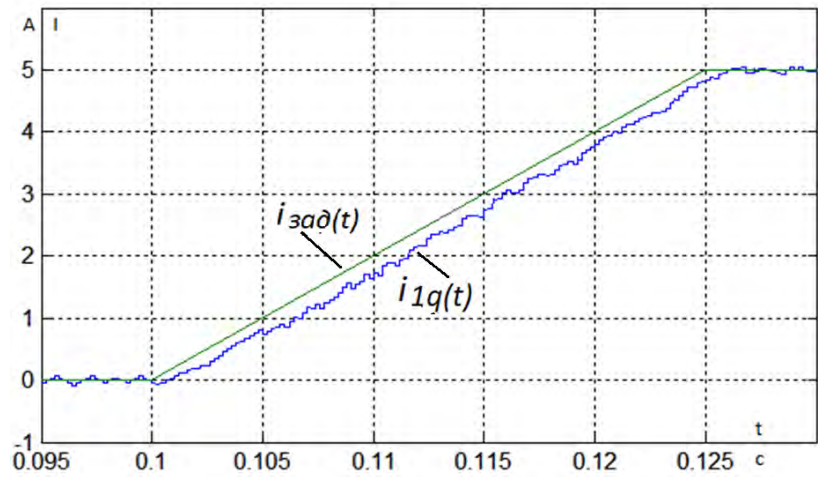
Рисунок 3.5. Процессы в контуре тока I_{1q} с настройкой $T_{к.т} = 0.5 \cdot T_{шим}$,
 $n_T = 1$ и $T_{зу.и} = T_{к.т}$



a



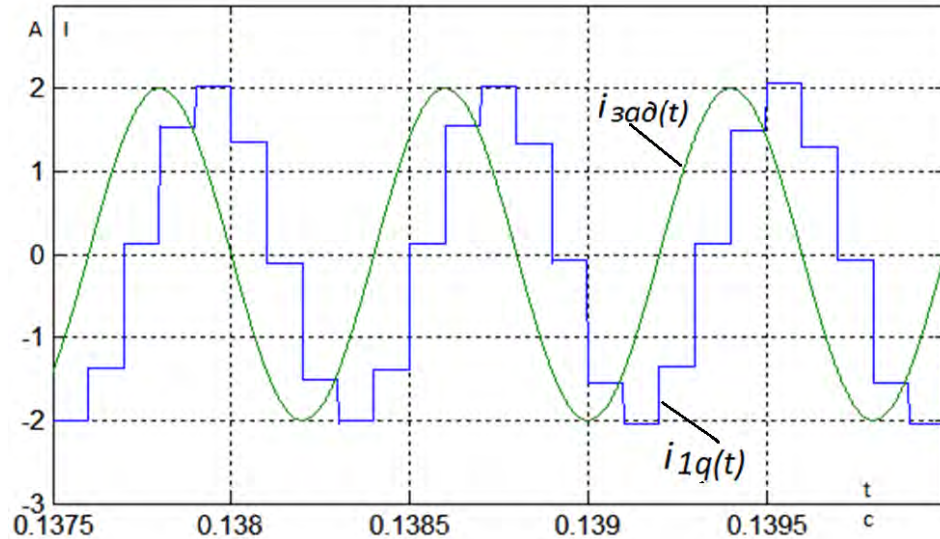
б



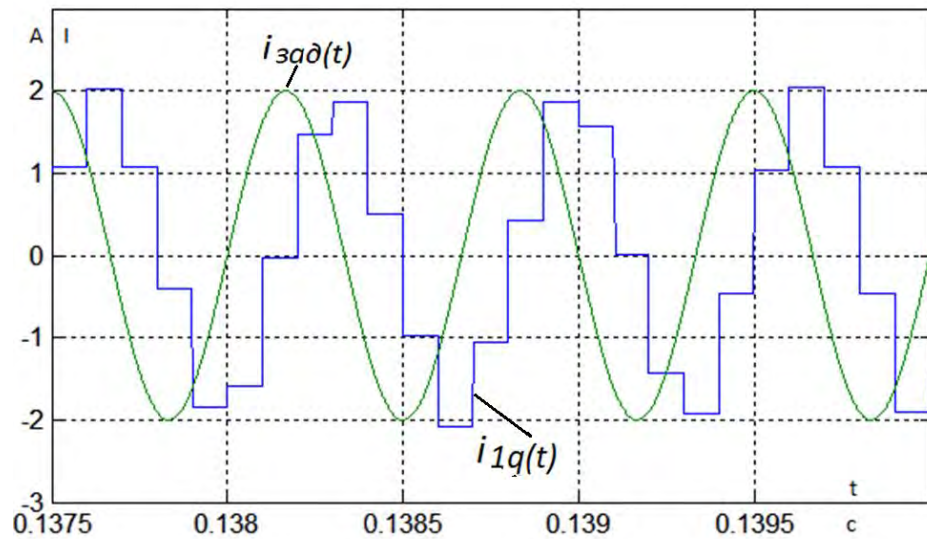
в

Рисунок 3.6. Процессы в контуре тока I_{1q} при моделировании в MATLAB с настройкой $T_{к.т} = T_{ш.им}$, $n_T = 3$ и $T_{з.у.и} = T_{к.т}$

Для оценки предельного быстродействия контура тока при моделировании было принято $T_{\text{зу.и}} = 0$. На рисунках 3.7, а и б показан процесс отработки контуром тока ступенчатого задания, соответственно, при $T_{\text{зу.и}} = T_{\text{к.т}}$ и $T_{\text{зу.и}} = 0$. На рисунке 3.8 приведены диаграммы заданного $i_{\text{зад}}(t)$ и фактического $i_{1q}(t)$ тока контура при отработке гармонического входного сигнала частотой 1000 и 1500 Гц.

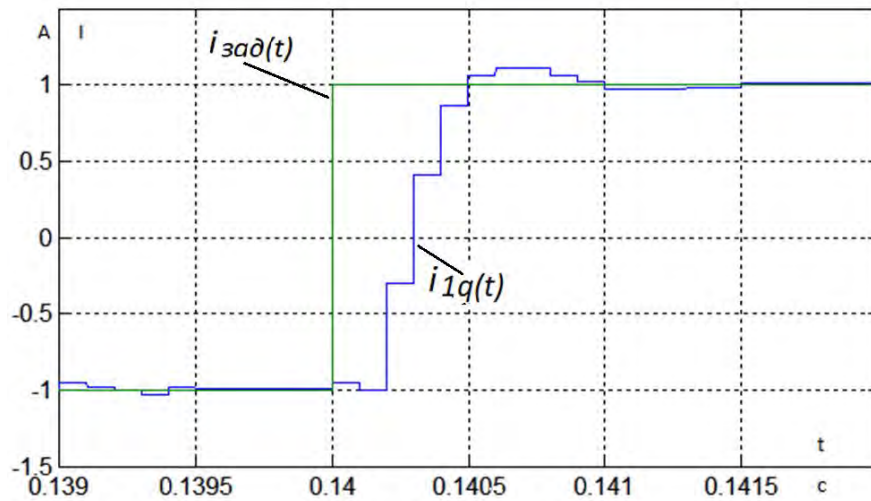


а

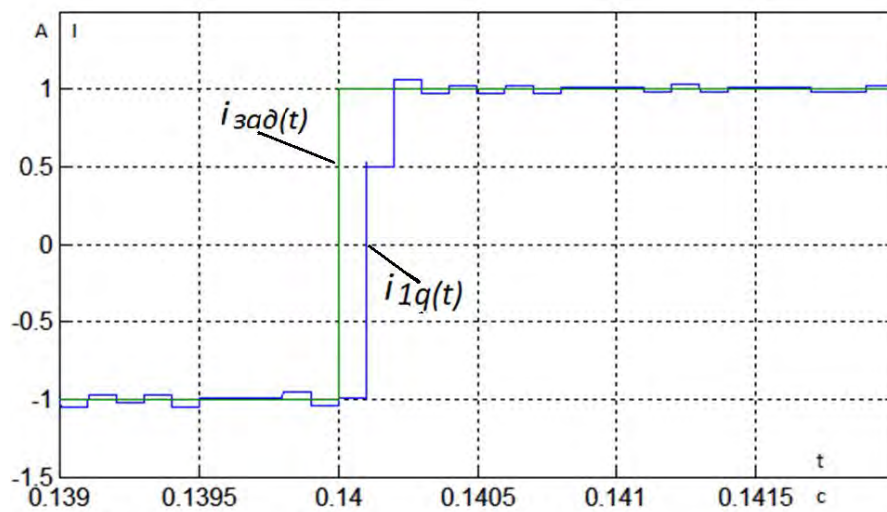


б

Рисунок 3.8. Отработка контуром тока с настройкой $T_{\text{к.т}} = 0.5 \cdot T_{\text{шим}}$, $n_{\text{т}} = 1$ и $T_{\text{зу.и}} = 0$ гармонического входного сигнала: а – $f_y = 1000$ Гц;
б – $f_y = 1500$ Гц



a



б

Рисунок 3.7. Отработка ступенчатого задания контуром тока с настройкой $T_{к.т} = 0.5 \cdot T_{шим}$, $n_T = 1$: *a* – $T_{зу.и} = T_{к.т}$; *б* – $T_{зу.и} = 0$

Динамические показатели контура тока однозначно определяются значением его эквивалентной малой постоянной времени $T_{мтэ}$, достижимые значения которой приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

$T_{к.т}$	$0.5 \cdot T_{шим}$						$T_{шим}$					
$T_{зу.и}$	0			$0.5 \cdot T_{шим}$			0			$T_{шим}$		
n_T	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
$T_{мтэ} / T_{шим}$	0.25	0.5	0.75	0.75	1	1.25	0.5	1	1.5	1.5	2	2.5

Выводы к разделу 3

1. При заданном значении $T_{\text{ШИМ}}$ предельное быстродействие контура тока достигается при выборе $T_{\text{к.т}} = 0.5 \cdot T_{\text{ШИМ}}$ и $n_{\text{т}} = 1$. Дальнейшее увеличение быстродействия контура возможно только при уменьшении (исключении) временной задержки управления инвертором $T_{\text{зу.и}}$. Однако при стремлении получить высокое быстродействие контуров тока необходимо одновременно обеспечить соответствующее быстродействие измерения токов и измерения или расчета потоков двигателя. По этой причине установка аналоговых фильтров в цепи измерительных датчиков нежелательна.

2. При отношении частоты квантования в контуре тока и частоты входного сигнала $\frac{f_{\text{к.т}}}{f_{\text{у}}} < 8$ начинает сильно сказываться квантование по времени и для увеличения частоты пропускания контура, прежде всего, необходимо увеличивать частоту ШИМ.

3. Для электроприводов производственных механизмов достаточно принять $T_{\text{к.т}} = T_{\text{ШИМ}}$, $T_{\text{зу.и}} = T_{\text{ШИМ}}$ и $n_{\text{т}} = (2 \div 4)$.

4. Хотя регуляторы тока из-за малого коэффициента усиления практически не работают в режиме насыщения, цифровые регуляторы с управляемой интегральной составляющей (рисунок 3.3, б) позволяют в этом случае обеспечить несколько большее быстродействие отработки заданного значения тока при отсутствии перерегулирования.

Раздел 4. Совместная работа контуров тока в системе векторного управления асинхронного электропривода

Регуляторы контуров регулирования токов I_{1d} и I_{1q} в системе векторного управления асинхронного электропривода (рисунок 4.1) формируют во вращающейся ортогональной системе координат d, q координатные управления

$$u_{1d} = u_{\text{рtd}} \text{ и } u_{1q} = u_{\text{ртq}} \quad (4.1)$$

вектора управления инвертором \vec{u}_{1dq} для двухфазного двигателя. Структурная схема двухфазного асинхронного двигателя во вращающейся системе координат d, q приведена на рисунке 2.1 в разделе 2, где эквивалентное сопротивление $R_{1\sigma}$ и постоянная времени $T_{1\sigma}$ цепи статора двигателя должны быть определены с учетом сопротивления соединительных проводов, соответственно, $R_{1\sigma}^*$, Ом и $T_{1\sigma}^*$, с.

По формулам обратного преобразования координат рассчитываются управления двухфазным:

$$u_{1\alpha} = u_{1d} \cdot \cos \varphi_{\text{кc}} - u_{1q} \cdot \sin \varphi_{\text{кc}}; \quad u_{1\beta} = u_{1d} \cdot \sin \varphi_{\text{кc}} + u_{1q} \cdot \cos \varphi_{\text{кc}},$$

а затем трехфазным двигателем:

$$u_{1a} = u_{1\alpha}; \quad u_{1b} = -\frac{1}{2} \cdot u_{1\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2} u_{1\beta}; \quad u_{1c} = -\frac{1}{2} \cdot u_{1\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2} u_{1\beta}.$$

В трехфазную систему управляющих инвертором сигналов вводится общий для всех управлений сигнал третьей гармоники:

$$u_{1a}^* = k \cdot (u_{1a} + u_{3f1} \cdot t); \quad u_{1b}^* = k \cdot (u_{1b} + u_{3f1} \cdot t); \quad u_{1c}^* = k \cdot (u_{1c} + u_{3f1} \cdot t),$$

где $k=1.1547$, $u_{3f1} = \frac{1}{6} \cdot \text{mod } \vec{u}_{1\alpha\beta} \cdot \cos(2\pi \cdot 3f_1 \cdot t)$, $\text{mod } \vec{u}_{1\alpha\beta}$ – модуль вектора управления.

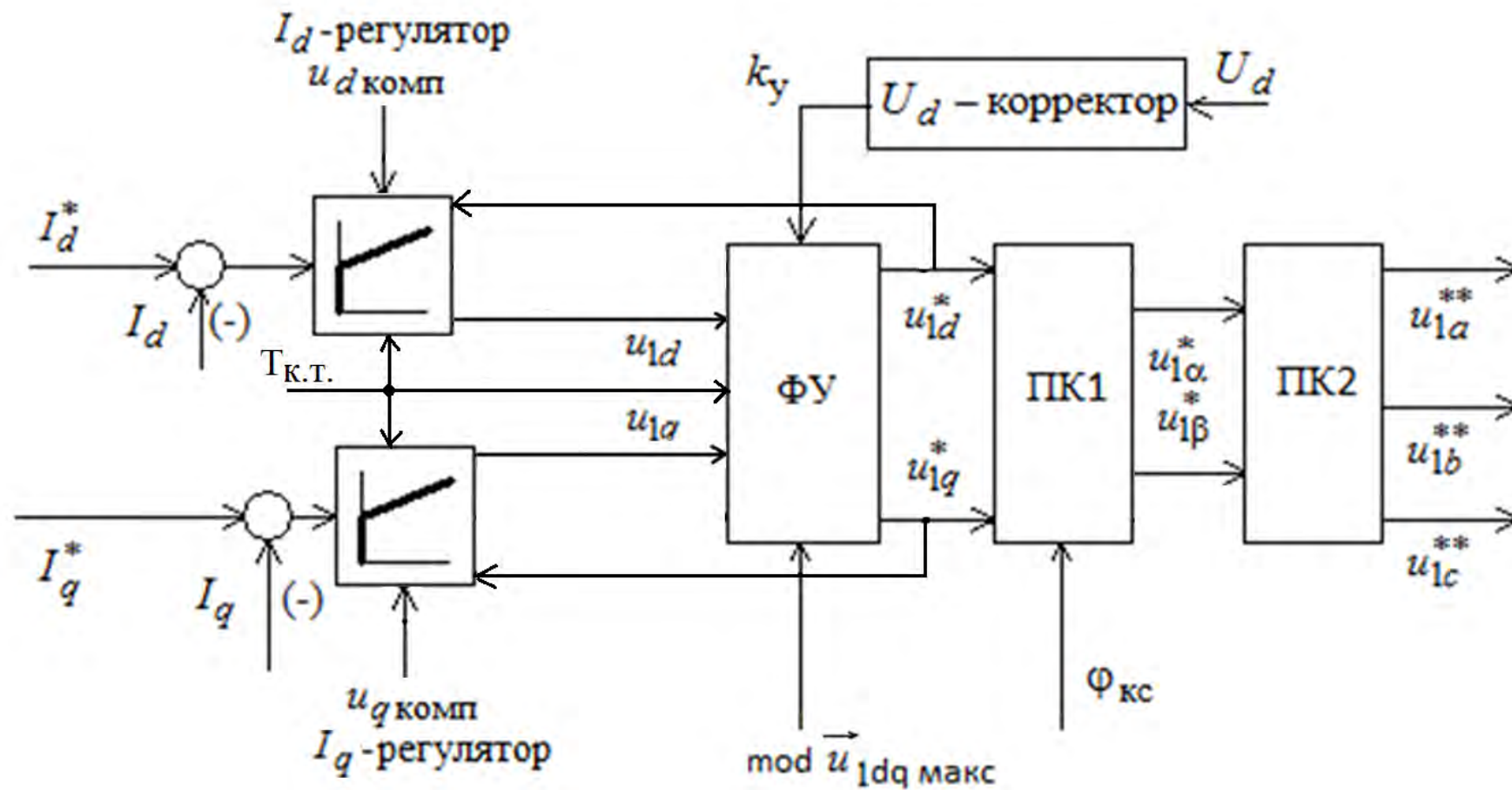


Рисунок 4.1. Схема формирования управлений инвертором в электроприводе с векторным управлением

Модуль вектора управления, соответствующий максимальному интервалу времени открытия ключей инвертора, должен быть ограничен, например единичным базовым значением

$$\text{mod } \overset{p}{u}_{1dq\text{макс}} = \text{mod } \overset{p}{u}_{1\alpha\beta\text{макс}} = \text{mod } \overset{p}{u}_{1abc\text{макс}} = 1.$$

Тогда модуль вектора управления $\overset{p}{u}_{1dq}$, сформированный регуляторами токов, должен удовлетворять условию

$$\text{mod } \overset{p}{u}_{1dq} = \sqrt{u_{1d}^2 + u_{1q}^2} \leq 1.$$

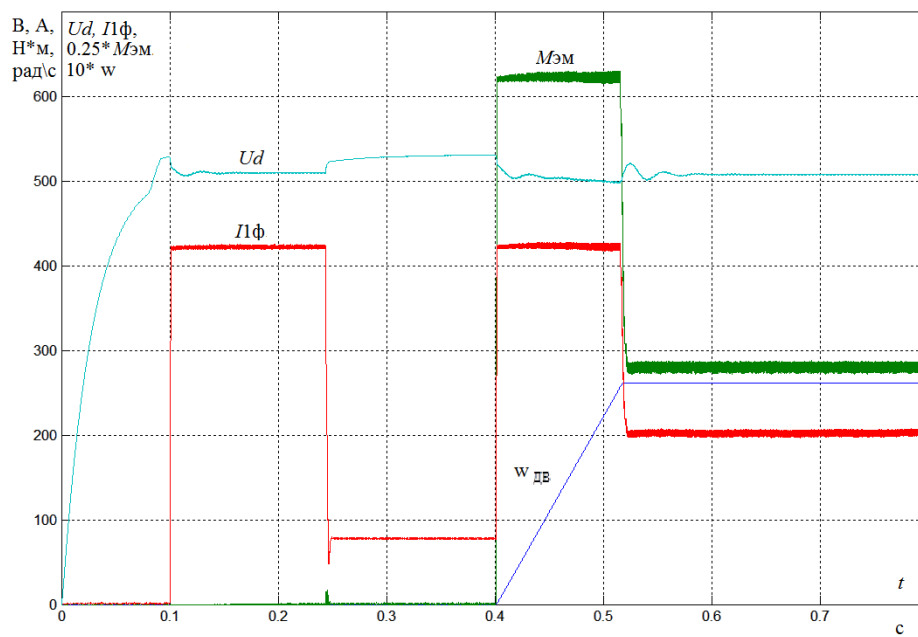
Приоритетным управлением двухфазным двигателем должно быть выбрано управление потоком, т.е. управление по координате d , тогда ограничение управления по координате d будет постоянным, а управление по координате q – зависимым от значения управления по координате d :

$$\text{mod } u_{1d\text{макс}} = 1; \quad \text{mod } u_{1q\text{макс}} = \sqrt{1 - (u_{1d})^2}. \quad (4.2)$$

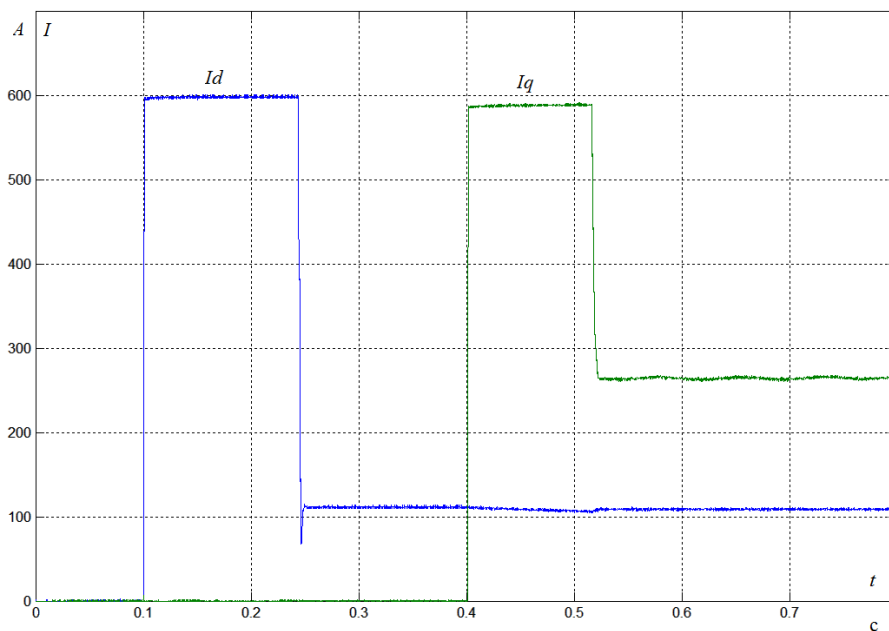
При таком подходе складывается следующий порядок подготовки электропривода к работе. После подачи напряжения конденсатор звена постоянного тока преобразователя частоты заряжается через ограничительный резистор, затем резистор шунтируется и на контур потокосцепления подается задание, формируется поток двигателя. Теперь привод готов к работе и может быть подано задание на отработку скорости вращения двигателя. На рисунке 4.2, *а* приведены диаграммы напряжения звена постоянного тока преобразователя $U_d(t)$, действующего значения фазного тока $I_{1\phi}(t)$, электромагнитного момента $M_{эм}(t)$ и скорости $\omega_{дв}(t)$ двигателя, а на рисунке 4.2, *б* – диаграммы токов $I_{1d}(t)$ и $I_{1q}(t)$ двухфазного двигателя, поясняющие процесс подготовки и начала работы электропривода.

Принципиально возможна одновременная подача заданий на формирование потока и отработку скорости вращения двигателя, но и в этом случае сначала будет сформирован поток и только после этого будет разрешено формирование электромагнитного момента двигателя.

Контур токов управляется независимо друг от друга: контур тока I_{1d} регулятором контура потокосцепления ротора, контур тока I_{1q} регулятором контура скорости двигателя. Однако в процессе работы контуры токов оказываются взаимосвязанными через инвертор, управление которым осуществляют совместно, и наличием внутренних перекрестных связей в двигателе.



a



б

Рисунок 4.2. Процесс подготовки и начала работы электропривода

Инвертор напряжения при амплитуде синусоидального сигнала управления, соответствующей максимальному интервалу времени открытия ключей, обеспечивает максимальное действующее значение выходного фазного напряжения

$$U_{\text{иф.макс}}(U_d) = \frac{U_d(U_c, I_{1\phi})}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2}}, \text{ В},$$

где $U_d(U_c, I_{1ф}) = k_{ucx} \cdot k_{uc} \cdot U_c$, В – напряжение на конденсаторе звена постоянного тока преобразователя частоты, $k_{ucx}(I_{1ф})$ – коэффициент схемы выпрямления с учетом изменения тока нагрузки, k_{uc} – коэффициент, учитывающий изменения напряжения сети U_c .

При принятом единичном базовом значении модуля вектора управления коэффициент усиления инвертора является величиной, зависящей от значения напряжения звена постоянного тока

$$k_{инв}(U_d) = \sqrt{2} \cdot U_{иф.макс}(U_d).$$

Максимальное значение напряжения инвертора определяется номинальным напряжением двигателя и должно быть ограничено

$$U_{иф.макс} = U_{иф.доп}, \text{ где } U_{иф.доп} \approx (1.05 \div 1.1) \cdot U_{1фн}.$$

Тогда наименьшее значение напряжения звена постоянного тока и напряжения сети, при которых обеспечивается выбранное значение $U_{иф.доп}$, определяются соответственно условиями:

$$U_{d\min}^* = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot (1.05 \div 1.1) \cdot U_{1фн} = (2.572 \div 2.694) \cdot U_{1фн}, \text{ В};$$

$$U_{с\min}^* = \frac{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot (1.05 \div 1.1) \cdot U_{1фн}}{k_{ucx}(I_{1фн})}, \text{ В}.$$

Для трехфазной мостовой схемы выпрямления коэффициент схемы $k_{ucx}(I_{1фн}) \approx 1.35$, тогда

$$U_{с\min}^* = \frac{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot (1.05 \div 1.1) \cdot U_{1фн}}{1.35} = (1.905 \div 2) \cdot U_{1фн}, \text{ В}.$$

При напряжении звена постоянного тока $U_d = U_{d\min}^*$ коэффициент усиления инвертора определяется выражением

$$k_{инв}(U_{d\min}^*) = \sqrt{2} \cdot U_{иф.доп} = \sqrt{2} \cdot (1.05 \div 1.1) \cdot U_{1фн}.$$

При изменениях напряжения сети и потребляемого двигателем тока напряжение звена постоянного тока не остается постоянным, и регулировочная характеристика преобразователя частоты $U_{пр}(i_{1abc}, U_d = \text{const})$ представляется семейством зависимостей, приведенным на рисунке 4.3.

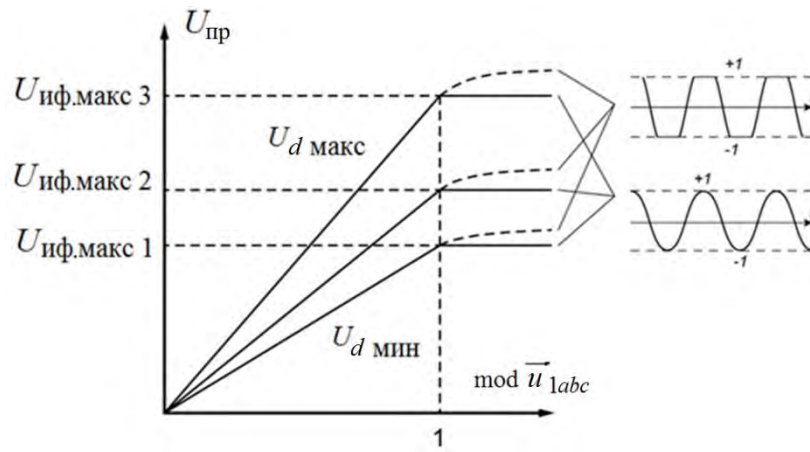


Рисунок 4.3. Семейство регулировочных характеристик преобразователя частоты в зависимости от напряжения звена постоянного тока

Для обеспечения постоянства настройки контуров тока необходимо при изменениях напряжения звена постоянного тока либо учитывать зависимость коэффициента передачи преобразователя частоты

$$k_{пр}(U_d) = k_{инв}(U_d) = \frac{U_d(U_c, I_{1ф})}{\sqrt{3}},$$

либо обеспечить постоянство его значения

$$k_{пр}(U_d) = k_{инв}(U_d) \cdot k_y(U_d) = \text{const},$$

где $k_y(U_d)$ – коэффициент коррекции управления инвертором в зависимости от напряжения звена постоянного тока.

Если принять

$$k_{пр} = k_{инв}(U_{d\text{ мин}}^*) = \sqrt{2} \cdot U_{иф.доп} = \sqrt{2} \cdot (1.05 \div 1.1) \cdot U_{1фн} = \text{const},$$

тогда

$$k_y(U_d) = \frac{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot (1.05 \div 1.1) \cdot U_{1фн}}{U_d}.$$

Очевидно, что при повышенном напряжении $U_d > U_{d\text{ мин}}^*$ для ограничения выходного напряжения инвертора на допустимом уровне потребуется ограничить управление на уровне $\text{mod } \vec{u}_{1dq\text{ макс}} < 1$. При пониженном напряжении $U_d < U_{d\text{ мин}}^*$ выходное напряжение инвертора будет ограничено значением $U_{иф.макс}(U_d)$, что меньше принятого допустимого значения $U_{иф.доп}$.

Таким образом, при изменениях напряжения звена постоянного тока необходимо корректировать не только текущее, но максимальное значение вектора управления инвертором. Возможны следующие способы реализации

компенсации изменений напряжения звена постоянного тока преобразователя, так называемого U_d -корректора.

Вариант 1. Регуляторы тока реализуются как адаптивные с зависимым от напряжения звена постоянного тока U_d значением коэффициента усиления

$$k_{\text{рт}}^* = k_{\text{рт}} \cdot k_y(U_d),$$

где $k_{\text{рт}}$ – значение коэффициента усиления регулятора тока, соответствующее коэффициенту передачи преобразователя $k_{\text{пр}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{иф.доп}}$.

По выражениям (4.1) определяются управления двухфазным двигателем во вращающейся системе координат u_{1d}^* , u_{1q}^* и ограничиваются их предельные значения

$$\text{mod } u_{1d}^*_{\text{макс}} = 1 \cdot k_y(U_d), \quad \text{mod } u_{1q}^*_{\text{макс}} = \sqrt{(1 \cdot k_y(U_d))^2 - (u_{1d}^*)^2}, \quad (4.3)$$

где принимается условие $k_y(U_d) \leq 1$.

Вариант 2. Регуляторы тока имеют постоянную настройку, соответствующую $k_{\text{пр}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{иф.доп}}$, а найденные управления двухфазным двигателем (4.1) корректируются

$$u_{1d}^* = u_{1d} \cdot k_y(U_d), \quad u_{1q}^* = u_{1q} \cdot k_y(U_d)$$

и ограничиваются их предельные значения в соответствии с условием (4.3).

Вариант 3. Регуляторы тока имеют постоянную настройку, соответствующую $k_{\text{пр}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{иф.доп}}$, найденные управления двухфазным двигателем (4.1) ограничиваются в соответствии с условием (4.2), затем находятся, корректируются и ограничиваются сигналы управления трехфазным двигателем в неподвижной системе координат:

$$u_{1a}^* = u_{1a} \cdot k_y(U_d), \quad u_{1b}^* = u_{1b} \cdot k_y(U_d), \quad u_{1c}^* = u_{1c} \cdot k_y(U_d);$$

$$\text{mod } u_{1a}^*_{\text{макс}} = 1, \quad \text{mod } u_{1b}^*_{\text{макс}} = 1, \quad \text{mod } u_{1c}^*_{\text{макс}} = 1.$$

Отключение интегрирования в режиме насыщения регуляторов токов I_{1d} и I_{1q} должно производиться после срабатывания ограничения соответствующих им управлений u_{1d} , u_{1q} или u_{1d}^* , u_{1q}^* .

При реализации управлений по вариантам 1 и 2 максимальные расчетные значения амплитуды управлений трехфазным двигателем $u_{1a}(t)$, $u_{1b}(t)$ и $u_{1c}(t)$ не могут превышать значения ± 1 , что не требует их дополнительного ограничения. При напряжении звена постоянного тока $U_d \geq U_{d\text{мин}}^*$ напряжение инвертора ограничивается на уровне $U_{\text{иф.доп}}$, а при напряжении $U_d < U_{d\text{мин}}^*$ – на уровне $U_{\text{иф.макс}}(U_d)$. Вариант 2 при изменении

коэффициента усиления инвертора изменяет значение как пропорциональной, так и интегральной составляющей регулятора, а вариант 1 изменяет только пропорциональную составляющую, а начальную интегральную оставляет неизменной. В этом плане более предпочтительна реализация второго варианта. Регулировочные характеристики инвертора с системой управления, реализованной по варианту 2, приведены на рисунке 4.4.

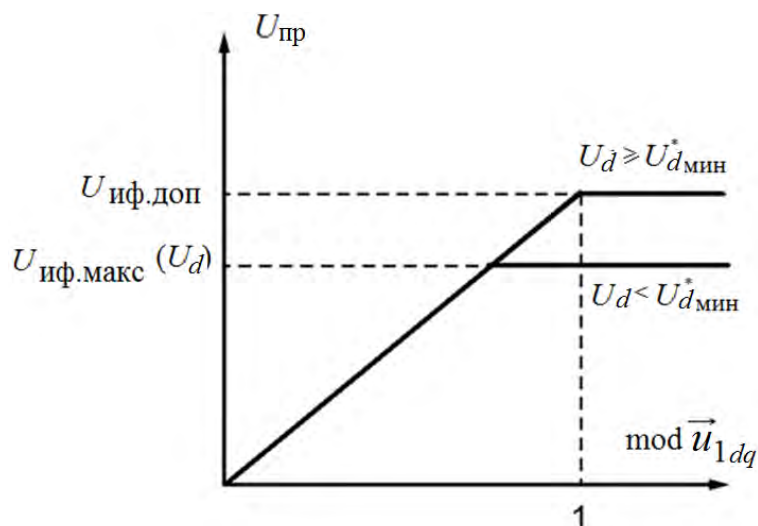


Рисунок 4.4. Регулировочные характеристики преобразователя с U_d -корректором и системой управления, реализованной по варианту 2

При реализации управлений по варианту 3 и напряжении звена постоянного тока $U_d < U_{d\text{мин}}^*$ максимальные расчетные значения амплитуды управлений трехфазным двигателем $u_{1a}^*(t), u_{1b}^*(t), u_{1c}^*(t)$ могут превышать значения ± 1 , что требует их дополнительного ограничения на этом уровне. После ограничения амплитуды управления приобретают трапецеидальную форму, что приводит к незначительному увеличению первой гармоники выходного напряжения инвертора (практически не более 5%) при существенном росте амплитуды высших нечетных (старше третьей) гармоник. При напряжении звена постоянного тока $U_d \geq U_{d\text{мин}}^*$ амплитуды управлений не превышают значения ± 1 , и напряжение инвертора ограничивается на уровне $U_{\text{иф.доп}}$.

На рисунке 4.5 приведены диаграммы тока $I_{1\phi}(t)$, электромагнитного момента $M_{\text{эм}}(t)$ и скорости $\omega_{\text{дв}}(t)$ двигателя, поясняющие выход электропривода на максимальную достижимую скорость при пониженном напряжении сети ($U_d < U_{d\text{мин}}^*$). Простое ограничение амплитуды управляющих сигналов инвертора хотя и позволяет достичь несколько

большого значения максимальной скорости, но вызывает существенные искажения формы тока и электромагнитного момента двигателя.

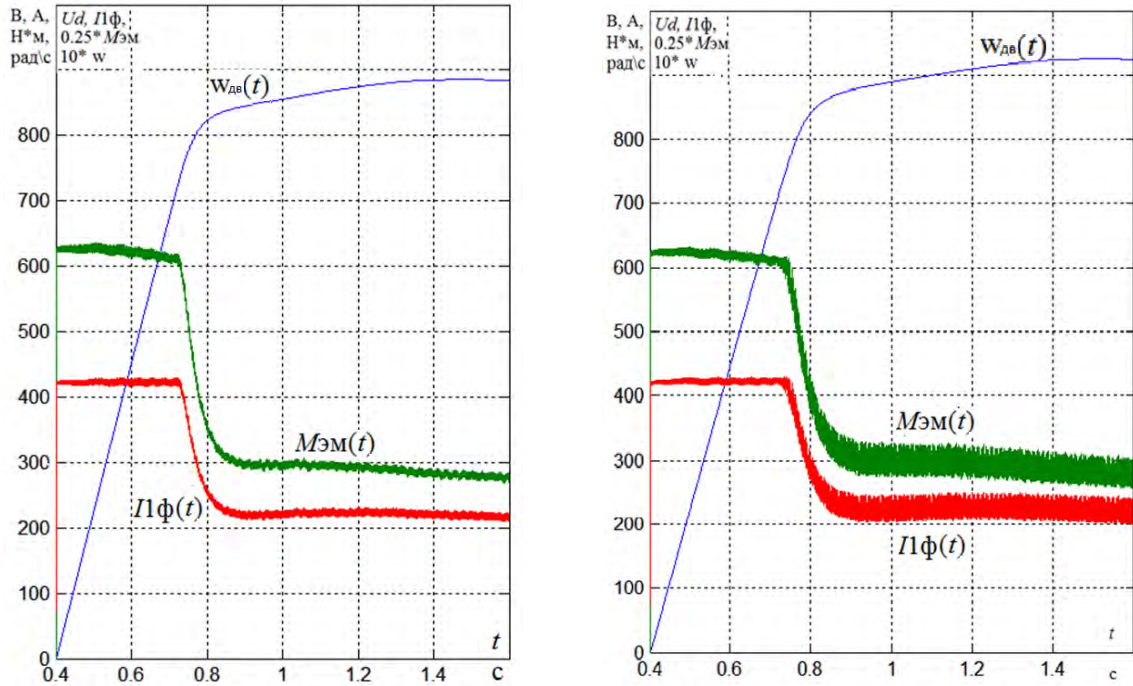


Рисунок 4.5. Работа электропривода при пониженном напряжении сети: *а* – при ограничении $\text{mod } i_{1dq}^*$ макс; *б* – при ограничении $\text{mod } i_{1abc}^*$ макс

В соответствии со структурной схемой модели двухфазного двигателя во вращающейся системе координат (см. рисунок 2.1 в разделе 2) инвертор по каждому каналу управления должен формировать по две составляющие выходного напряжения:

– основные, формирующие заданные значения токов $I_{1d}(t)$ и $I_{1q}(t)$,

$$U_{1d}(I_{1d}) = R_{1\varnothing}^* \cdot I_{1d} + L_1 \cdot \frac{dI_{1d}}{dt} = \left(R_1 + R_2' \cdot \frac{L_m^2}{L_2'^2} \right) \cdot I_{1d} + \sigma \cdot L_1 \cdot \frac{dI_{1d}}{dt},$$

$$U_{1q}(I_{1q}) = R_{1\varnothing}^* \cdot I_{1q} + L_1 \cdot \frac{dI_{1q}}{dt} = \left(R_1 + R_2' \cdot \frac{L_m^2}{L_2'^2} \right) \cdot I_{1q} + \sigma \cdot L_1 \cdot \frac{dI_{1q}}{dt};$$

– дополнительные, компенсирующие напряжения внутренних перекрестных связей двигателя,

$$U_{1d \text{ комп}} = -R_2' \cdot \frac{L_m}{L_2'^2} \cdot \Psi_{2d} - \sigma \cdot L_1 \cdot R_2' \cdot \frac{L_m}{L_2'} \cdot \frac{I_{1q}}{\Psi_{2d}} \cdot I_{1q} - \sigma \cdot L_1 \cdot I_{1q} \cdot z_p \cdot \omega_{\text{дв}},$$

$$U_{1q \text{ комп}} = \left(\frac{L_m}{L_2'} \cdot \Psi_{2d} + \sigma \cdot L_1 \cdot I_{1d} \right) \cdot z_p \cdot \omega_{\text{дв}} + \sigma \cdot L_1 \cdot R_2' \cdot \frac{L_m}{L_2'} \cdot \frac{I_{1q}}{\Psi_{2d}} \cdot I_{1d}.$$

С учетом принятого единичного базового значения модуля вектора управления для формирования требуемых напряжений управления двухфазным двигателем необходимы следующие сигналы управления инвертором:

$$u_{1d} = \frac{U_{1d} (I_{1d})}{k_{\text{пр}}(U_d)} + \frac{U_{1d \text{ комп}}}{k_{\text{пр}}(U_d)} = u_d (I_{1d}) + u_{d \text{ комп}} ;$$

$$u_{1q} = \frac{U_{1q} (I_{1q})}{k_{\text{пр}}(U_d)} + \frac{U_{1q \text{ комп}}}{k_{\text{пр}}(U_d)} = u_q (I_{1q}) + u_{q \text{ комп}} .$$

Принципиально регуляторы токов могут формировать полные сигналы управления инвертором

$$u_{\text{рtd}} = u_d (I_{1d}) + u_{d \text{ комп}} , \quad u_{\text{ртq}} = u_q (I_{1q}) + u_{q \text{ комп}} ,$$

но можно ограничить задачу регуляторов формированием только основных сигналов управления

$$u_{\text{рtd}} = u_d (I_{1d}) ; \quad u_{\text{ртq}} = u_q (I_{1q}) ,$$

а компенсационные сигналы формировать отдельно и затем суммировать их

$$u_{1d} = u_{\text{рtd}} + u_{d \text{ комп}} , \quad u_{1q} = u_{\text{ртq}} + u_{q \text{ комп}} .$$

При расчете компенсационных сигналов для реализации варианта 1 необходимо знание переменного значения фактического коэффициента преобразователя $k_{\text{пр}}(U_d) = k_{\text{инв}}(U_d)$, а для вариантов 2 и 3 – постоянного значения $k_{\text{пр}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{иф.доп}}$.

Компенсационные сигналы содержат медленно изменяющиеся составляющие, зависящие от потокосцепления и скорости вращения двигателя, и быстро изменяющиеся составляющие, связанные с изменением токов (рисунок 4.6). При дискретном управлении из-за постоянного запаздывания управления компенсация взаимного влияния контуров токов на уровне электромагнитных процессов не только не может быть достигнута. Компенсация медленно меняющихся сигналов перекрестных связей двигателя принципиально может самостоятельно решаться регуляторами токов.

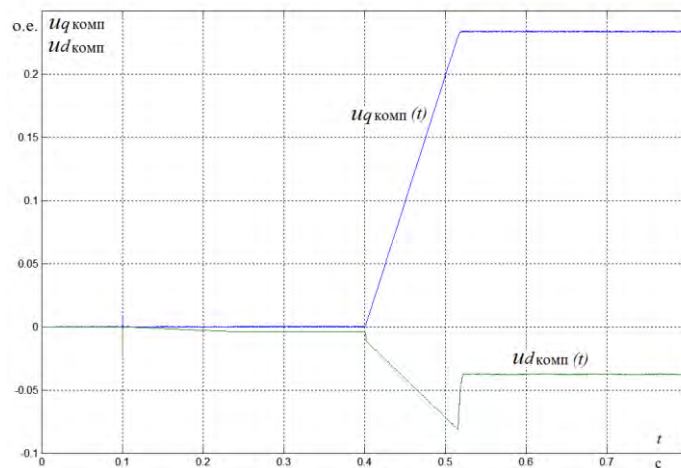


Рисунок 4.6. Диаграммы компенсационных сигналов $u_{d\text{ комп}}$ и $u_{q\text{ комп}}$, соответствующие процессу подготовки и начала работы электропривода

Схема блока формирования компенсационных сигналов $u_{d\text{ комп}}$ и $u_{q\text{ комп}}$ приведена на рисунке 4.7.

Исследования работы контуров тока проводились в составе асинхронного электропривода с электродвигателем фирмы SIEMENS серии 1LG4317-6AA ($U_{1\text{лн}} = 400 \text{ В}$, $P_{\text{н}} = 132 \text{ кВт}$, $n_{\text{н}} = 988 \text{ об/мин}$, $I_{1\text{лн}} = 235 \text{ А}$, $M_{\text{н}} = 1276 \text{ Н}\cdot\text{м}$) и частотным векторным управлением. Модель электропривода разработана в соответствии с рекомендациями, приведенными в [21], и учитывает широтно-импульсную модуляцию выходного напряжения инвертора с частотой $f_{\text{шим}} = 5000 \text{ Гц}$.

Контуров тока настроены в соответствии с методикой, приведенной в разделе 3, при следующих параметрах настройки: разрядность $n_{\text{ацп.дт}} = 10$ и временной интервал оцифровки $T_{\text{к.дт}} = T_{\text{шим}}$ АЦП датчика тока; временной интервал квантования в контуре тока $T_{\text{к.т}} = T_{\text{шим}}$; временной интервал задержки управления инвертором $T_{\text{з.у.и}} = 0$; $n_{\text{т}} = 1$. Угол поворота координатной системы $\varphi_{\text{кс}}$ получен с помощью модели двигателя без учета квантования по времени и уровню. Моделирование проводилось с малым шагом расчета $\Delta t = 1 \cdot 10^{-6} \text{ с}$.

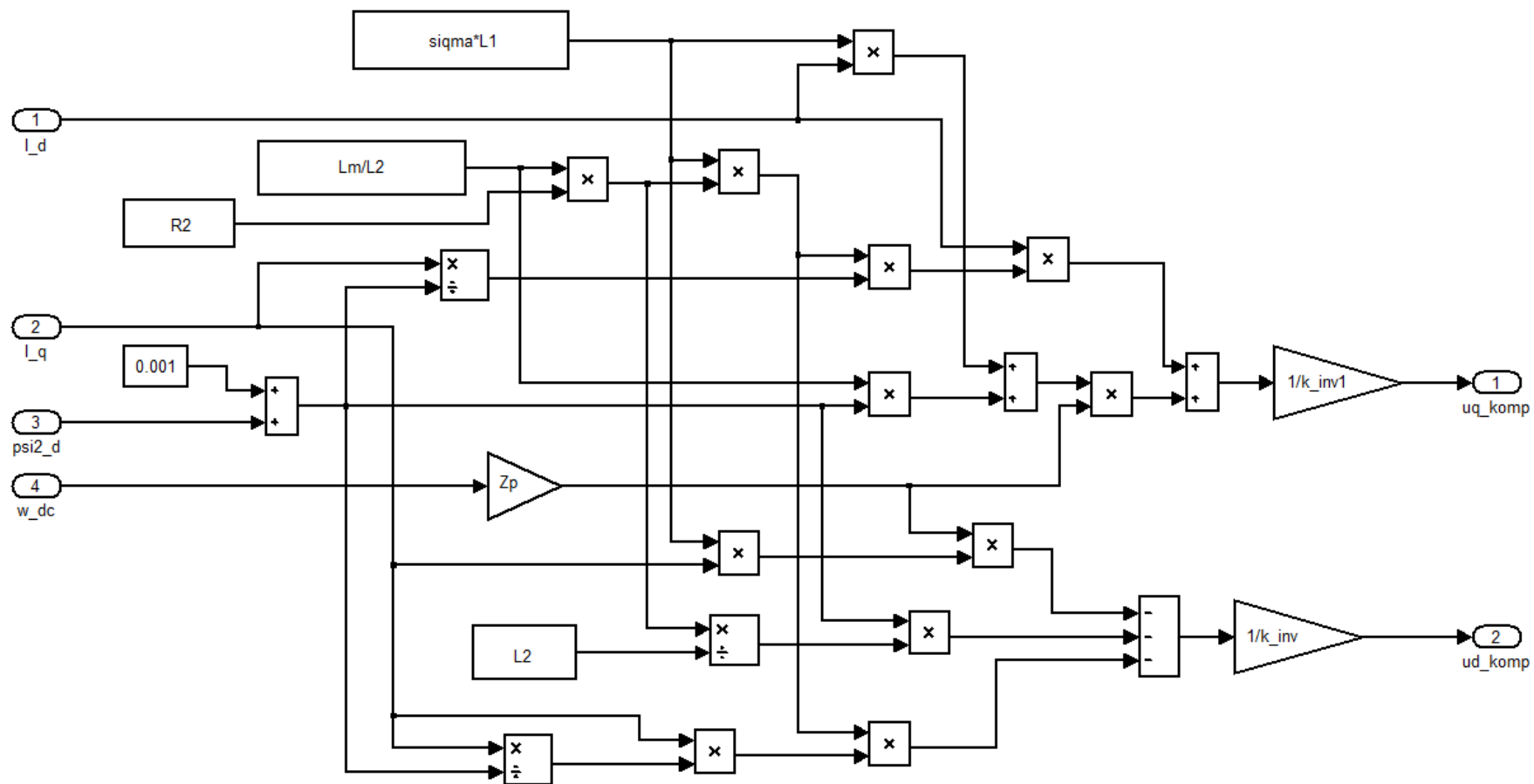


Рисунок 4.7 – Схема формирователя компенсационных сигналов управления $u_{d_комп}$ и $u_{q_комп}$

Регуляторы тока реализованы по схеме цифрового ПИ-регулятора с управлением интегральной составляющей в режиме насыщения (рисунок 3.3, б) и зависимым ограничением выходного сигнала: $\text{mod } u_{1d}^* = 1 \cdot k_y(U_d)$ для регулятора тока I_{1d} и $\text{mod } u_{1q}^* = \sqrt{(1 \cdot k_y(U_d))^2 - (u_{1d}^*)^2}$ для регулятора тока I_{1q} . Схема ПИ-регулятора тока приведена на рисунке 4.8.

Формирование управляющих сигналов u_{1d}^* , u_{1q}^* в соответствии с условием (4.3) и ограничение выходных сигналов регуляторов тока осуществляется формирователем, схема которого приведена на рисунке 4.9.

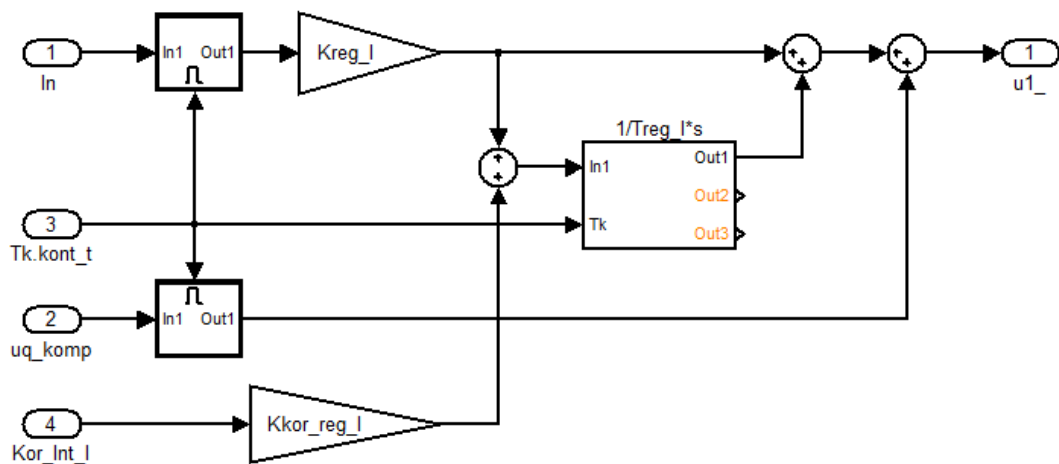


Рисунок 4.8. ПИ-регулятора тока с управлением интегральной составляющей в режиме насыщения и зависимым ограничением выходного сигнала

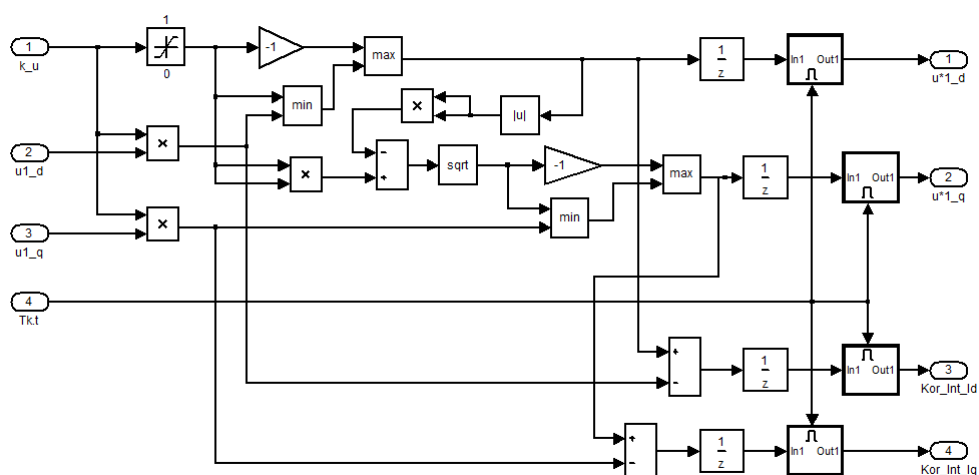


Рисунок 4.9. Схема формирователя управлений инвертором

Выводы к разделу 4

1. Контур тока I_{1d} , обеспечивающий создание потока возбуждения двигателя, должен обладать приоритетом перед контуром тока I_{1q} , обеспечивающим создание электромагнитного момента двигателя.

2. Непостоянство напряжения звена постоянного тока преобразователя частоты, вызванное изменениями напряжения питающей сети и нагрузки двигателя, приводит к существенному изменению коэффициента усиления инвертора и в результате к нарушению настройки контуров токов.

3. Для компенсации влияния изменения коэффициента усиления инвертора необходимо корректировать как текущее, так и максимальное значение вектора управления инвертором. Предложены варианты реализации корректировки и дана им сравнительная оценка.

4. Регуляторы токов должны формировать основные сигналы управления инвертором, обеспечивающих заданные значения токов, и дополнительные, компенсирующие влияние внутренних перекрестных связей двигателя. Принципиально можно освободить регуляторы от формирования дополнительных сигналов управления, если формировать их отдельно в виде компенсационных сигналов. Установлено, что влияние внутренних перекрестных связей двигателя, связанных с быстро протекающими процессами изменения токов из-за дискретности управления инвертором компенсировать не удастся. Компенсация влияния внутренних перекрестных связей двигателя, связанных с относительно медленными изменениями потока и скорости вращения двигателя, легко достигается как самими регуляторами токов, так и при независимом формировании компенсирующих сигналов.

5. Контур тока I_{1d} может быть настроен на меньшее быстродействие за счет выбора $T_{к.тd} > T_{к.тq}$, $n_{Td} > n_{Tq}$ или просто уменьшением коэффициента усиления регулятора.

Раздел 5. Настройка и исследование контура потокосцепления асинхронного электропривода с частотным векторным управлением

Контур потокосцепления (для краткости потока) является внешним контуром в двухконтурной системе регулирования потокосцепления ротора (САР потока) асинхронного двигателя в электроприводе с частотным векторным управлением (рисунок 5.1). Внутренним контуром САР потока является контур регулирования тока I_{ld} эквивалентного двухфазного асинхронного двигателя во вращающейся системе координат d, q [см. раздел 4].

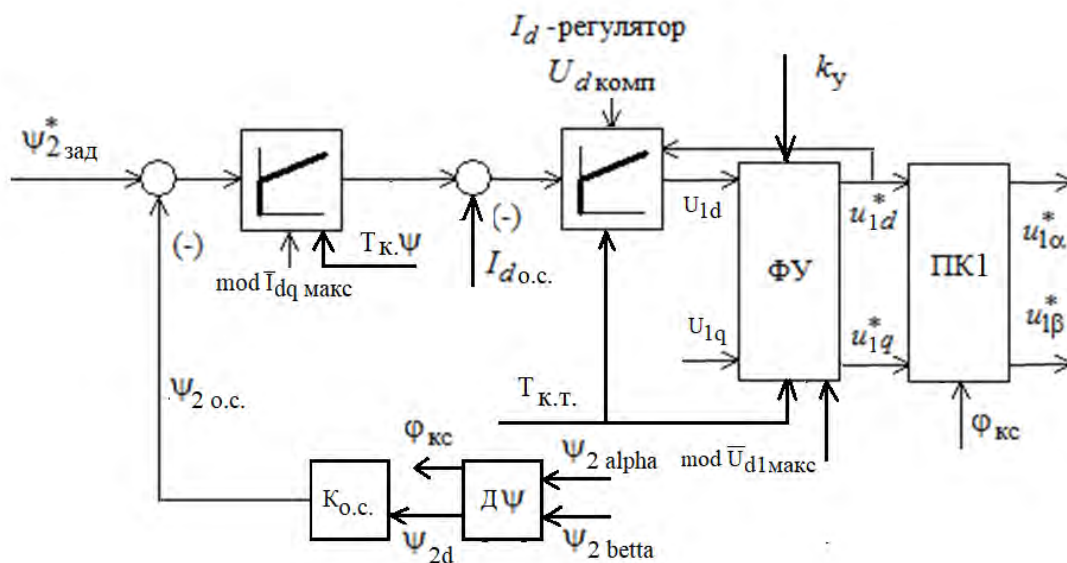


Рисунок 5.1. Функциональная схема контура потокоцепления

Задачей САР потока является поддержание номинального значения потока двигателя в первой и заданной зависимости потока от скорости во второй зоне регулирования скорости вращения двигателя. При наличии в двигателе встроенных датчиков потока в зазоре двигателя измеряются проекции потока $\Psi_{2\alpha}$, $\Psi_{2\beta}$ на оси неподвижной системы координат α и β модели двухфазного двигателя. Аналоговые сигналы датчиков потока преобразуются в цифровые сигналы аналого-цифровыми преобразователями (АЦП). На основании измеренных значений потоков $\Psi_{2\alpha}$ и $\Psi_{2\beta}$ рассчитываются значения модуля вектора потокосцепления ротора и его угол (угол поворота вращающейся координатной системы):

$$\Psi_{2d} = \text{mod } \Psi_2 = \sqrt{\Psi_{2\alpha}^2 + \Psi_{2\beta}^2}; \quad \varphi_{\text{KC}} = \text{arctg} \frac{\Psi_{2\beta}}{\Psi_{2\alpha}}.$$

Значение потока Ψ_{2d} используется в цепи обратной связи контура регулирования потока. Значение угла $\varphi_{\text{кс}}$ используется для преобразования координат моделей двигателя в неподвижной и вращающейся системах координат.

Оценка требований к параметрам расчета потока Ψ_{2d} и угла поворота $\varphi_{\text{кс}}$ осуществлялась отдельно методом компьютерного моделирования в среде *MATLAB + Simulink*.

Исследования проводились на модели асинхронного электропривода с электродвигателем фирмы SIEMENS серии 1LG4317-6AA ($U_{1\text{лн}} = 400 \text{ В}$, $P_{\text{н}} = 132 \text{ кВт}$, $n_{\text{н}} = 988 \text{ об/мин}$, $I_{1\text{лн}} = 235 \text{ А}$, $M_{\text{н}} = 1276 \text{ Н}\cdot\text{м}$) и частотным векторным управлением. Модель электропривода разработана в соответствии с рекомендациями, приведенными в [1], и учитывает широтно-импульсную модуляцию выходного напряжения инвертора с частотой $f_{\text{шим}} = 5000 \text{ Гц}$. Контур тока настроен при интервале квантования $T_{\text{к.т}} = T_{\text{пк.т}} = T_{\text{ос.т}} = T_{\text{шим}}$ на максимальное быстродействие: $T_{\text{зу.и}} = 0$, $n_{\text{т}} = 1$ [20, 21]. В контуре скорости принят аналоговый датчик с параметрами АЦП: разрядность $n_{\text{ацпдс}} = 16$, временной интервал оцифровки $T_{\text{к.дс}} = T_{\text{шим}}$, контур настроен на максимальное быстродействие при выборе интервала квантования $T_{\text{к.с}} = T_{\text{пк.с}} = T_{\text{ос.с}} = T_{\text{шим}}$. В качестве датчика потока принят аналоговый датчик с параметрами: $n_{\text{ацпд}\Psi}$ – разрядность; $T_{\text{к.д}\Psi}$ – временной интервал оцифровки АЦП датчика потока.

Общие условия настройки контура потокосцепления: $T_{\text{к.}\Psi} = T_{\text{пк.}\Psi} \geq T_{\text{к.тд}}$; $T_{\text{ос.}\Psi} \leq T_{\text{пк.}\Psi}$; $T_{\text{к.д}\Psi} \leq T_{\text{ос.}\Psi}$, где $T_{\text{пк.}\Psi}$, $T_{\text{ос.}\Psi}$ и $T_{\text{к.}\Psi}$ – временные интервалы квантования сигналов в прямом канале, в цепи обратной связи и его результирующее значение в контуре потока.

Исходные параметры для расчета и настройки контура потока: $f_{\text{шим}}$ – частота ШИМ инвертора, Гц; R_1^* (с учетом сопротивления соединительных проводов), R_2' , L_m , L_1 , L_2' , σ , T_2 , z_p – параметры двигателя и структурной схемы двигателя; $\Psi_{2\text{н}}$ – номинальное значение потокосцепления ротора, Вб; $I_{1\text{фмакс}}$ – максимальный фазный ток двигателя в режимах пуска и торможения, А; $k_{\text{т}}$ – коэффициент обратной связи по току, 1/А; $T_{\text{мтдэ}}$ – эквивалентная малая постоянная времени контура тока I_{1d} , с.

Расчет параметров датчика потока:

– максимальное измеряемое значение потока

$$\Psi_{2\text{изм.макс}} \geq (1.05 \div 1.1) \cdot \Psi_{2\text{н}}, \text{ Вб};$$

– коэффициент передачи датчика

$$k_{д\psi} = \frac{0.5 \cdot 2^{n_{\text{ацп д}\psi}}}{\Psi_{2\text{изм. макс}}}, 1/\text{Вб},$$

где $n_{\text{ацп д}\psi}$ – разрядность АЦП датчика;

– масштабирующий коэффициент преобразования выходного сигнала датчика потока

$$k_{\psi \text{ д}\psi} = \frac{\Psi_{2\text{изм. макс}}}{0.5 \cdot 2^{n_{\text{ацп д}\psi}}} = 1/k_{д\psi}, \text{ Вб}.$$

Расчет параметров настройки контура потока:

– коэффициент согласования сигнала обратной связи на входе регулятора потока

$$k_{\text{ос.}\psi} = \frac{N_{\text{ос.}\psi \text{ макс}}}{\Psi_{2\text{изм. макс}}},$$

где $N_{\text{ос.}\psi \text{ макс}}$ – максимальное значение сигнала обратной связи, задается в абсолютных, например $N_{\text{ос.}\psi \text{ макс}} = \Psi_{2\text{изм. макс}}$, или относительных, например $N_{\text{ос.}\psi \text{ макс}} = 1$, единицах;

– коэффициент обратной связи по потоку

$$k_{\psi} = \frac{N_{\text{ос.}\psi \text{ макс}}}{\Psi_{2\text{изм. макс}}}, 1/\text{Вб};$$

– максимальное значение задания потока на входе контура

$$N_{з\psi \text{ макс}} = k_{\psi} \cdot \Psi_{2\text{н}};$$

– эквивалентная малая постоянная времени контура потока

$$T_{\mu\psi\text{э}} = T_{\text{тд}} + \frac{T_{\text{пк.}\psi}}{n_{\psi}} + T_{\text{ф.о}\psi}, \text{ с},$$

где $T_{\text{тд}} = 2 \cdot T_{\text{мтдэ}}$ – эквивалентная постоянная времени замкнутого контура тока $I_{1д}$, с, $n_{\psi} = (1 \div 3)$ – коэффициент аппроксимации звеньев с чистым запаздыванием в контуре потока эквивалентным апериодическим звеном, $T_{\text{ф.о}\psi}$ – постоянная времени фильтра в цепи аналогового датчика потока;

– постоянная времени регулятора потока

$$T_{\text{р}\psi} = T_2, \text{ с};$$

– коэффициент усиления регулятора потока

$$k_{\text{р}\psi} = \frac{T_2 \cdot k_{\text{т}}}{L_m \cdot k_{\psi} \cdot 2 \cdot T_{\mu\psi\text{э}}};$$

– максимальное значение выходного сигнала регулятора потока

$$N_{\text{р}\psi \text{ доп}} = k_{\text{т}} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1\text{ф макс}}.$$

Быстродействие контура потока определяется значением интервала квантования $T_{\text{пк.}\Psi}$ и достигается при равных значениях интервалов квантования сигналов в контуре потока и тока I_{1d} . При значении коэффициента $n_{\Psi} = 2$ настройка контура потока близка к настройке на МО контура второго порядка.

Первоначально параметры датчиков потока приняты постоянными: $n_{\text{ацпд}\Psi} = 16$, $T_{\text{к.д}\Psi} = T_{\text{шим}} = 0.0002 \text{ с}$, а контур потока настроен на максимальное быстродействие при выборе $T_{\text{к.}\Psi} = T_{\text{к.т}}$, $n_{\Psi} = 2$. В процессе исследований параметры расчета потока Ψ_{2d} (интервал квантования $T_{\Psi_{2d}}$ и разрядность $n_{\Psi_{2d}}$) и угла поворота $\varphi_{\text{кс}}$ (интервал квантования $T_{\varphi_{\text{кс}}}$ и разрядность $n_{\varphi_{\text{кс}}}$) изменялись независимо друг от друга.

Прежде всего, были получены приведенные на рисунке 5.2 диаграммы токов $I_{1d}(t)$, $I_{1q}(t)$, тока $I_{1\phi}(t)$, электромагнитного момента $M_{\text{эм}}(t)$ и скорости $\omega_{\text{дв}}(t)$ двигателя в процессе намагничивания двигателя и последующей отработки заданного значения скорости электропривода при принятых параметрах настройки контура потока и следующих параметрах расчета потока Ψ_{2d} и угла $\varphi_{\text{кс}}$: $n_{\Psi_{2d}} = n_{\varphi_{\text{кс}}} = 16$, $T_{\Psi_{2d}} = T_{\varphi_{\text{кс}}} = 0.0002 \text{ с}$. На всех рисунках раздела приняты следующие масштабы: $m_i = 1$, $m_m = 0.25$, $m_{\omega} = 10$.

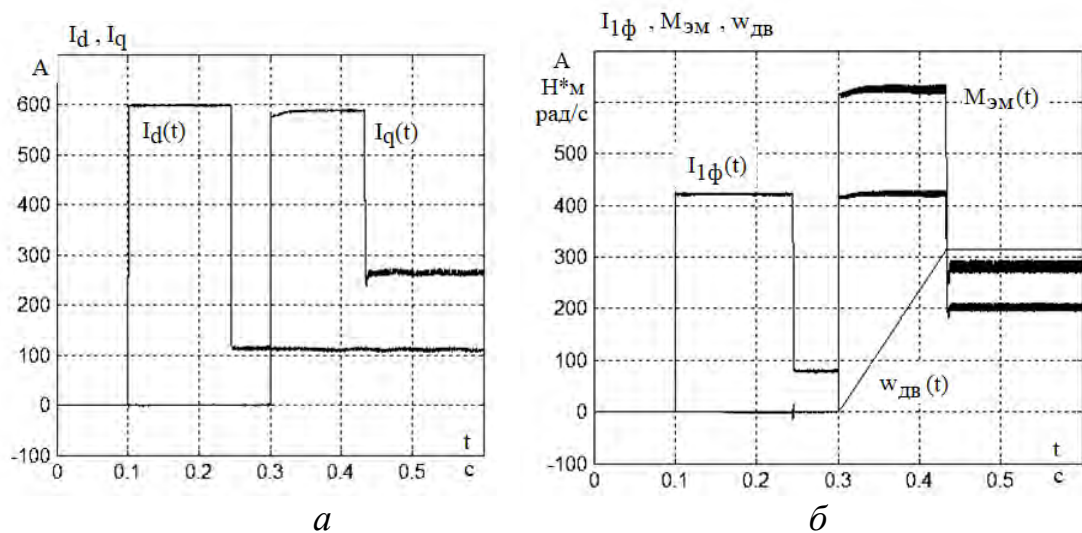


Рисунок 5.2. Диаграммы токов, момента и скорости двигателя при начально принятых параметрах настройки

Максимальное быстродействие САР потока имеет место при выборе $T_{\text{пк.}\Psi} = T_{\text{ос.}\Psi} = T_{\text{к.т}}$. Изменение интервала квантования по времени сигнала

потока в цепи обратной связи $T_{ос.Ψ}$ требует изменения настройки контура потока. Увеличение интервала квантования потока в цепи обратной связи контура приводит к уменьшению его быстродействия. Принципиально контур потока может быть настроен при выборе временного интервала квантования в широких пределах от 0.004 с до $T_{ос.Ψ} = T_{к.т}$ или $T_{ос.Ψ} = 0.5 \cdot T_{к.т}$ (диапазон частот квантования в контуре потока от 250 Гц до $2f_{шум}$). При уменьшении разрядности сигнала потока в цепи обратной связи $n_{ос.Ψ} \leq 12$ наблюдаются значительные пульсации тока I_{1d} , что вызывает пульсации тока I_{1q} и электромагнитного момента $M_{эм}$ двигателя. На рисунке 5.3 приведены диаграммы токов $I_{1d}(t)$, $I_{1q}(t)$, полученные, соответственно, при увеличении интервала и уменьшении разрядности квантования сигнала потока в цепи обратной связи контура.

Улучшение формы тока I_{1d} при малой разрядности сигнала потока в цепи обратной связи возможно при одновременном уменьшении быстродействия контуров потока и тока I_{1d} . На рисунке 5.4 приведены диаграммы токов, электромагнитного момента и скорости двигателя, полученные при $n_{Ψ_{2d}} = 12$, $T_{Ψ_{2d}} = 0.0002$ с и одновременной настройке контуров тока I_{1d} и потока на меньшее быстродействие: $T_{dз.и} = T_{шум}$, $n_{Td} = 2$, $T_{пк.Ψ} = T_{Ψ_{2d}} = 0.002$ с, $n_{Ψ} = 2$.

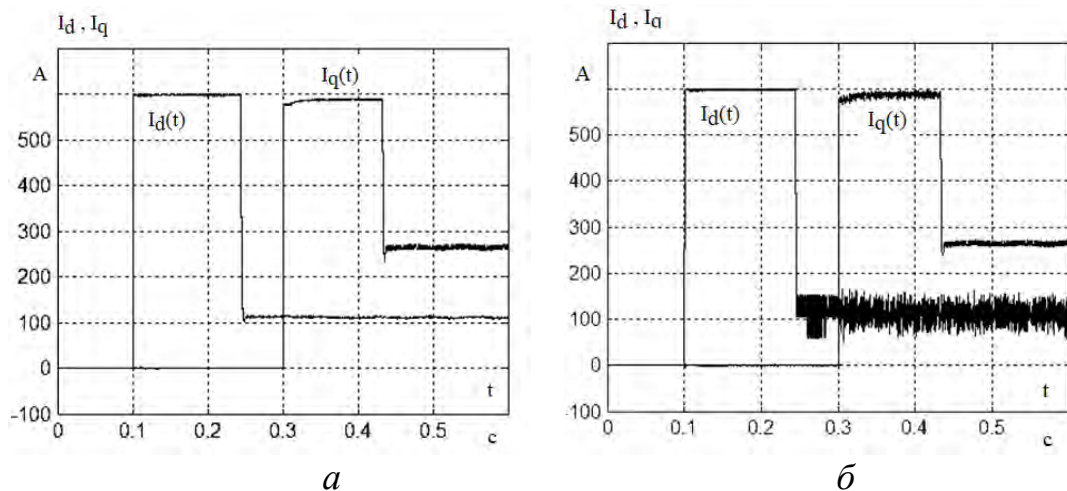


Рисунок 5.3. Диаграммы токов в зависимости от квантования потока $Ψ_{2d}$: а – $T_{Ψ_{2d}} = 0.002$ с, $n_{Ψ_{2d}} = 16$; б – $n_{Ψ_{2d}} = 12$, $T_{Ψ_{2d}} = 0.0002$ с

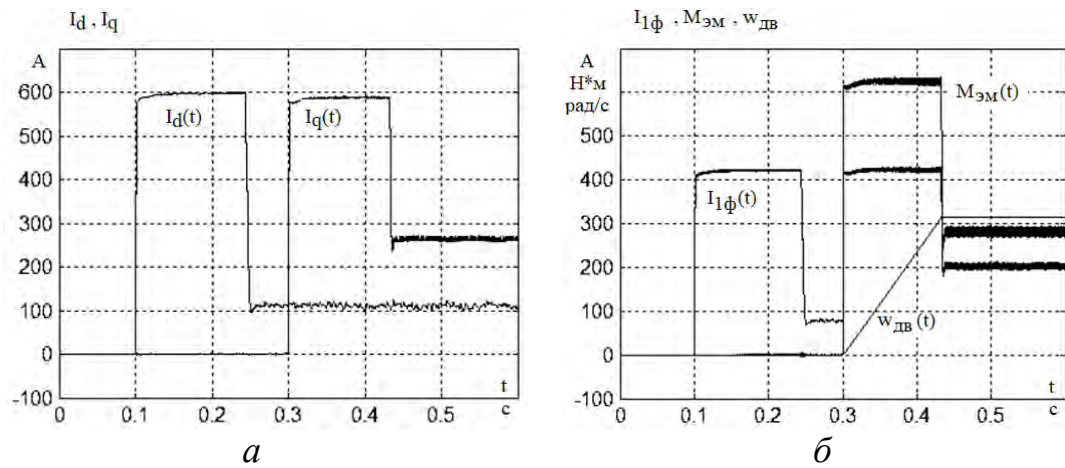


Рисунок 5.4. Диаграммы токов, момента и скорости двигателя при $n_{\Psi_{2d}} = 12$, $T_{\Psi_{2d}} = 0.0002$ с и уменьшенном быстродействии контуров САР потока

Квантование значений угла φ_{kc} по уровню мало влияет на работу контуров регулирования токов и потока, а к квантованию по времени, наоборот, оказываются весьма чувствительными оба контура регулирования токов. На рисунке 5.5 приведены диаграммы токов $I_{1d}(t)$ и $I_{1q}(t)$, полученные при изменении параметров квантования по времени и уровню значений угла поворота координатной системы φ_{kc} .

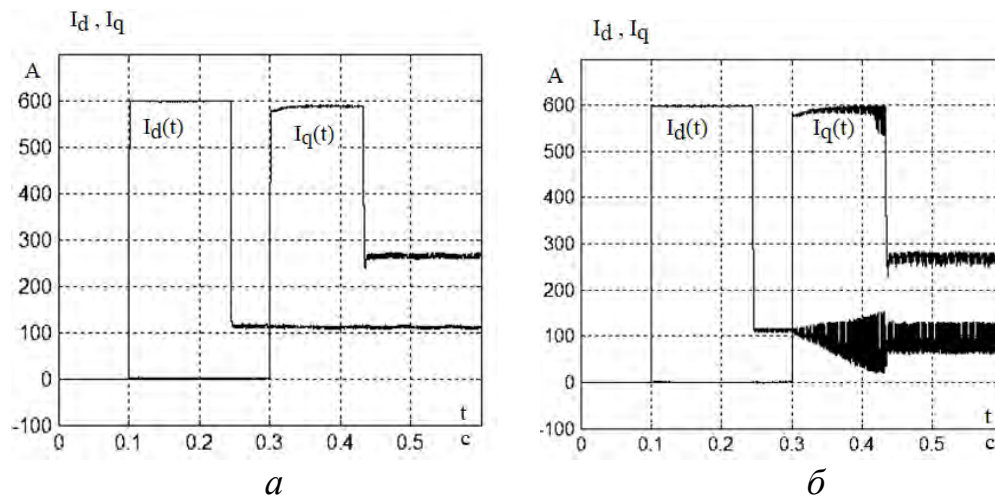


Рисунок 5.5. Диаграммы токов в зависимости от квантования угла φ_{kc} : а – $n_{\varphi_{kc}} = 12$, $T_{\varphi_{kc}} = 0.0002$ с; б – $T_{\varphi_{kc}} = 0.002$ с, $n_{\varphi_{kc}} = 16$

Снижение быстродействия контуров САР потока и САР скорости позволяет уменьшить, но не позволяет решить эту проблему. На рисунке 5.6 приведены диаграммы токов, электромагнитного момента и скорости

двигателя, полученные при $T_{\varphi_{\text{к}}} = 0.002 \text{ с}$, $n_{\varphi_{\text{к}}} = 16$ и настройке контуров токов, потока и скорости на меньшее быстродействие: $T_{\text{зу.и}} = T_{\text{шим}}$, $n_{\text{т}} = 2$, $T_{\text{пк.}\Psi} = T_{\text{к.с}} = 0.002 \text{ с}$, $n_{\Psi} = 2$, $n_{\text{с}} = 2$.

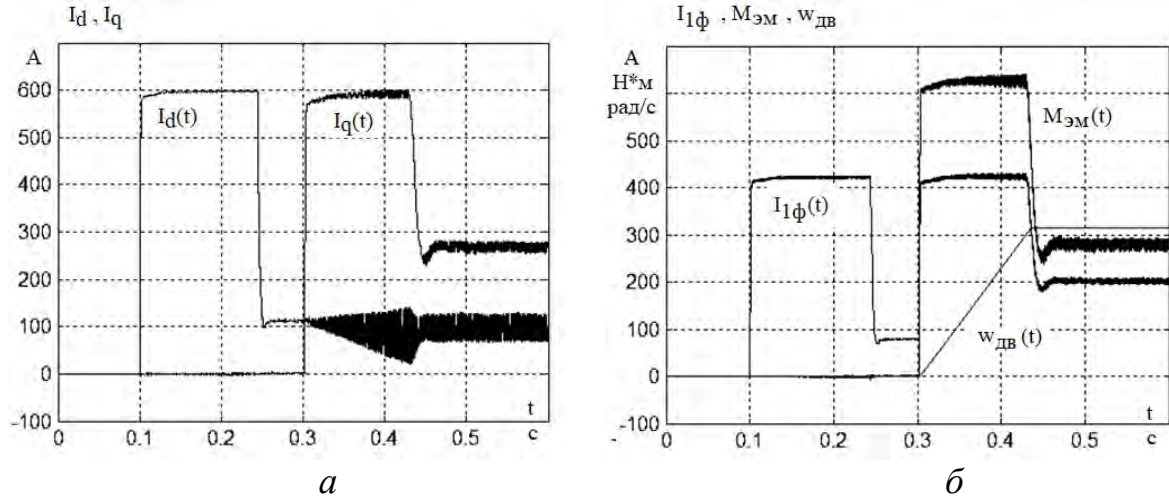


Рисунок 5.6. Диаграммы токов, момента и скорости двигателя при $T_{\varphi_{\text{к}}} = 0.002 \text{ с}$, $n_{\varphi_{\text{к}}} = 16$ и уменьшенном быстродействии контуров САР потока и скорости.

Поскольку датчик потока общий, квантование по уровню и времени измеренных и оцифрованных значений потоков $\Psi_{2\alpha}$, $\Psi_{2\beta}$ должно одновременно удовлетворять требованиям к расчету потока Ψ_{2d} и угла поворота $\varphi_{\text{к}}$. Поэтому временной интервал оцифровки датчиков потока должен быть равен интервалу расчета в контуре тока I_{1q} $T_{\text{к.д}\Psi} = T_{\varphi_{\text{к}}} = T_{\text{к.т}}$, разрядность АЦП следует выбрать из условия $n_{\text{ацпд}\Psi} \geq 12$, а для настройки контура потока принять: $T_{\text{к.}\Psi} = T_{\text{пк.}\Psi} = T_{\text{ос.}\Psi} \geq T_{\text{к.д}\Psi}$ и $n_{\text{ос.}\Psi} = n_{\text{ацпд}\Psi}$.

На рисунке 5.7 приведены диаграммы токов, электромагнитного момента и скорости двигателя, полученные при $n_{\text{ацпд}\Psi} = 12$, $T_{\text{к.д}\Psi} = 0.0002 \text{ с}$ и параметрах настройки контуров САР потока: $T_{\text{дзу.и}} = T_{\text{шим}}$, $n_{\text{тд}} = 2$, $T_{\text{к.}\Psi} = 0.002 \text{ с}$, $n_{\Psi} = 2$.

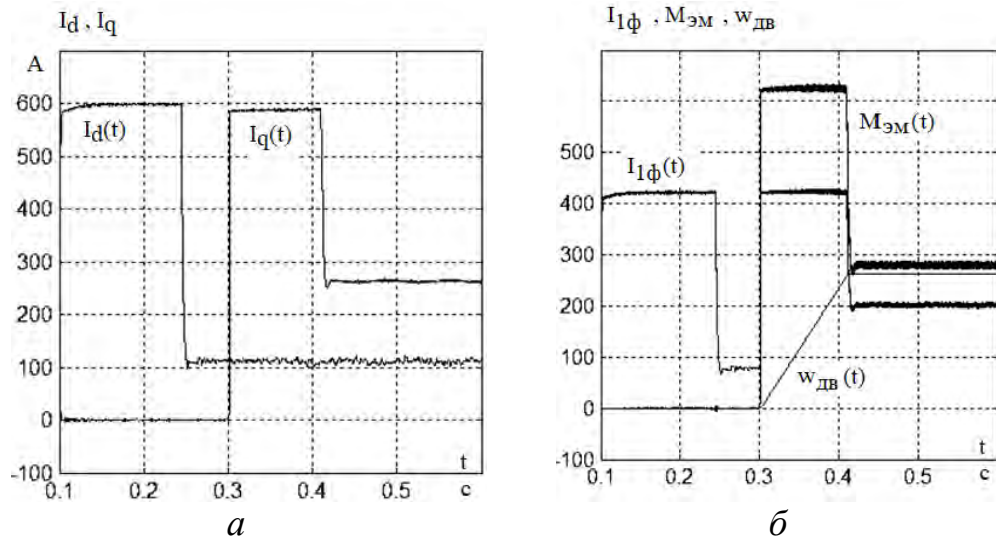


Рисунок 5.7. Диаграммы токов, момента и скорости двигателя в электроприводе с общим датчиком потока: $n_{\text{ацпд}\Psi} = 12$, $T_{\text{к.д}\Psi} = 0.0002 \text{ с}$

При отсутствии в двигателе встроенных датчиков потока расчет значений потоков по осям α, β двигателя и угла поворота координатной системы $\varphi_{\text{кс}}$ осуществляется так называемыми наблюдателями потока. Простейшие (неадаптивные) наблюдатели реализуются на моделях электромагнитных процессов статора или ротора двухфазного двигателя в неподвижной или во вращающейся системе координат. Адаптивные наблюдатели потока строятся на одновременном использовании моделей статора и ротора двигателя и содержат регуляторы, адаптирующие модель наблюдателя к реальным процессам в двигателе.

Реализация моделей электромагнитных процессов в статоре осложняется выполнением операции интегрирования в выражениях:

$$\Psi_{2\alpha} = \frac{L'_2}{L_m} \cdot \int_0^t (u_{1\alpha} - i_{1\alpha} \cdot R_1^*) dt - \frac{\sigma \cdot L_1 \cdot L'_2}{L_m} \cdot i_{1\alpha} ;$$

$$\Psi_{2\beta} = \frac{L'_2}{L_m} \cdot \int_0^t (u_{1\beta} - i_{1\beta} \cdot R_1^*) dt - \frac{\sigma \cdot L_1 \cdot L'_2}{L_m} \cdot i_{1\beta} .$$

Несинусоидальная форма напряжений и токов двигателя приводит к накоплению постоянной составляющей расчетных значений потоков. В значительной степени избежать этого позволяет замена интегратора апериодическим звеном (рисунок 5.8), но до конца проблема этим не решается.

Вторым недостатком наблюдателя на основе модели статора является необходимость знания не измеряемых значений фазных напряжений двигателя $u_{1\alpha}$ и $u_{1\beta}$.

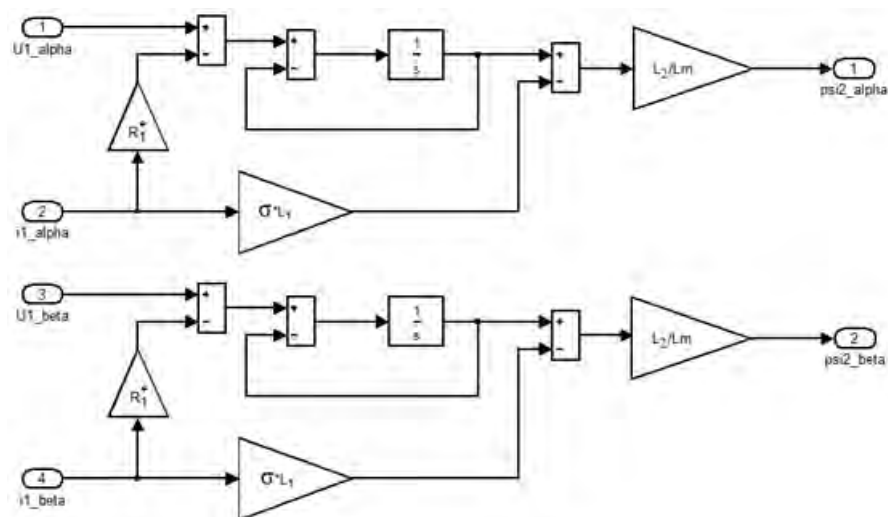
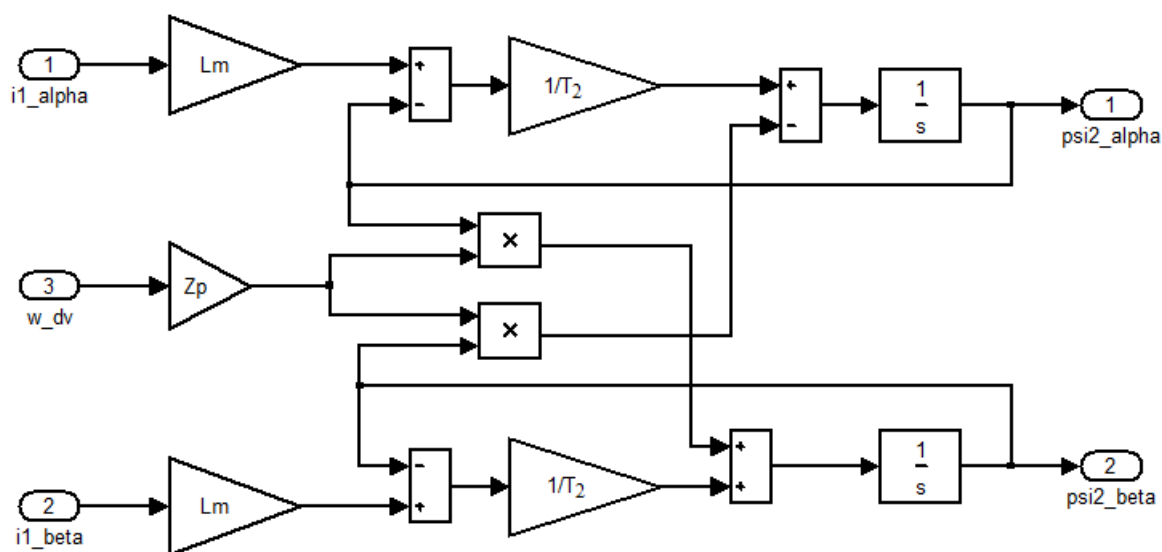
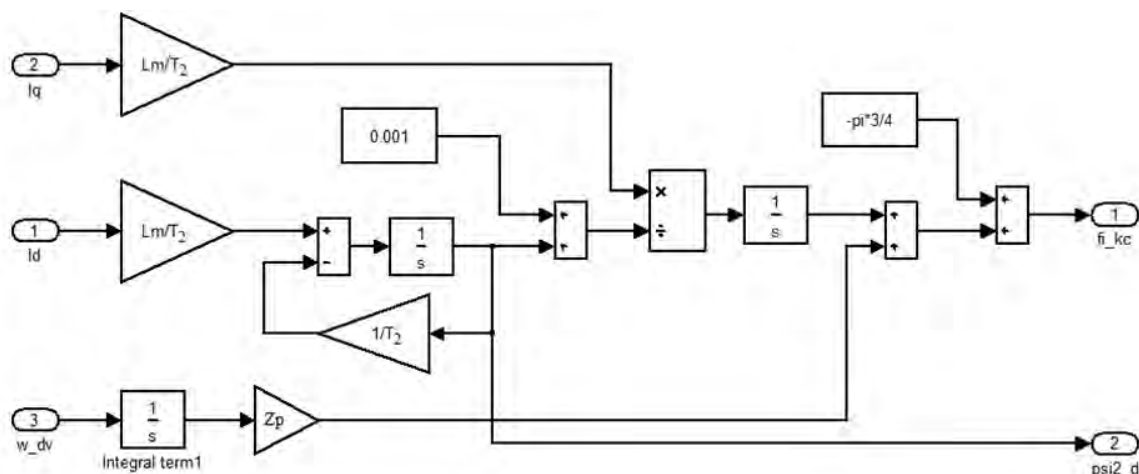


Рисунок 5.8. Модель статора в системе координат α, β

Более целесообразно использовать лишенные этого недостатка модель ротора. Возможные схемы реализации наблюдателей потока, основанные на моделях ротора, соответственно в системах координат α, β и d, q , приведены на рисунке 5.9.



a



б

Рисунок 5.9. Наблюдатели потока на основе моделей ротора в системе координат: а – α, β ; б – d, q

Расчет параметров настройки контура потока с наблюдателем:

– временной интервал расчета (квантования) $T_{к.набл\psi} = T_{к.т}$, с;

– максимальное расчетное значение потока

$$\Psi_{2расч.макс} \geq (1.05 \div 1.1) \cdot \Psi_{2н}, \text{ Вб};$$

– коэффициент согласования сигнала обратной связи на входе регулятора потока

$$k_{ос.\psi} = k_{\psi} = \frac{N_{ос.\psi \text{ макс}}}{\Psi_{2расч.макс}}$$

и далее расчет ведется в соответствии с приведенной выше методикой.

Наблюдатели на основе моделей ротора требуют знания скорости вращения двигателя. Временной интервал расчета наблюдателей потока $T_{к.набл\psi}$ должен быть равен периоду расчета $T_{к.т}$ в контурах тока, следовательно, и временной интервал квантования значений скорости $T_{\omega_{набл}}$ так же должен быть равен периоду расчета в контурах тока. К квантованию по уровню значений измеренной скорости $n_{\omega_{набл}}$ работа наблюдателей менее чувствительна. При точном знании параметров двигателя простейшие наблюдатели потока на основе модели ротора позволяют настроить контуры САР потока и скорости на максимальное возможное быстродействие при выбранном значении $T_{к.т}$ и $T_{\omega_{набл}} = T_{к.т}$. Однако, требование высокой частоты оцифровки датчика скорости затрудняет его практическую реализацию.

На рисунке 5.10 приведены диаграммы токов, электромагнитного момента и скорости двигателя, полученные при начально принятой настройке

системы управления на максимальное быстродействие и параметрах наблюдателя рисунка 5.9, а: $T_{к.набл\Psi} = 0.0002 \text{ с}$, $T_{\omega_{набл}} = 0.0002 \text{ с}$, $n_{\omega_{набл}} = 12$.

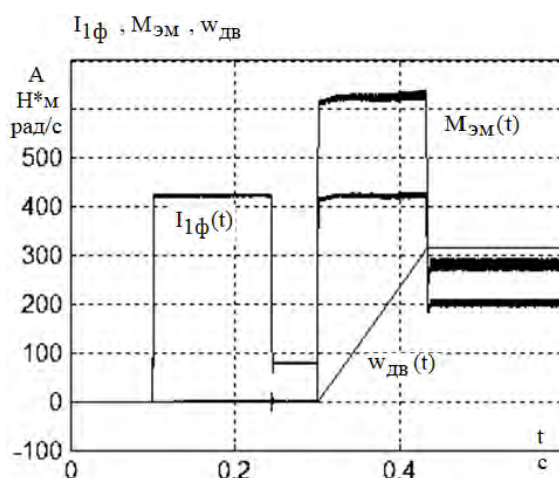


Рисунок 5.10. Диаграммы токов, момента и скорости двигателя в электроприводе с наблюдателем потока рисунка 5.9

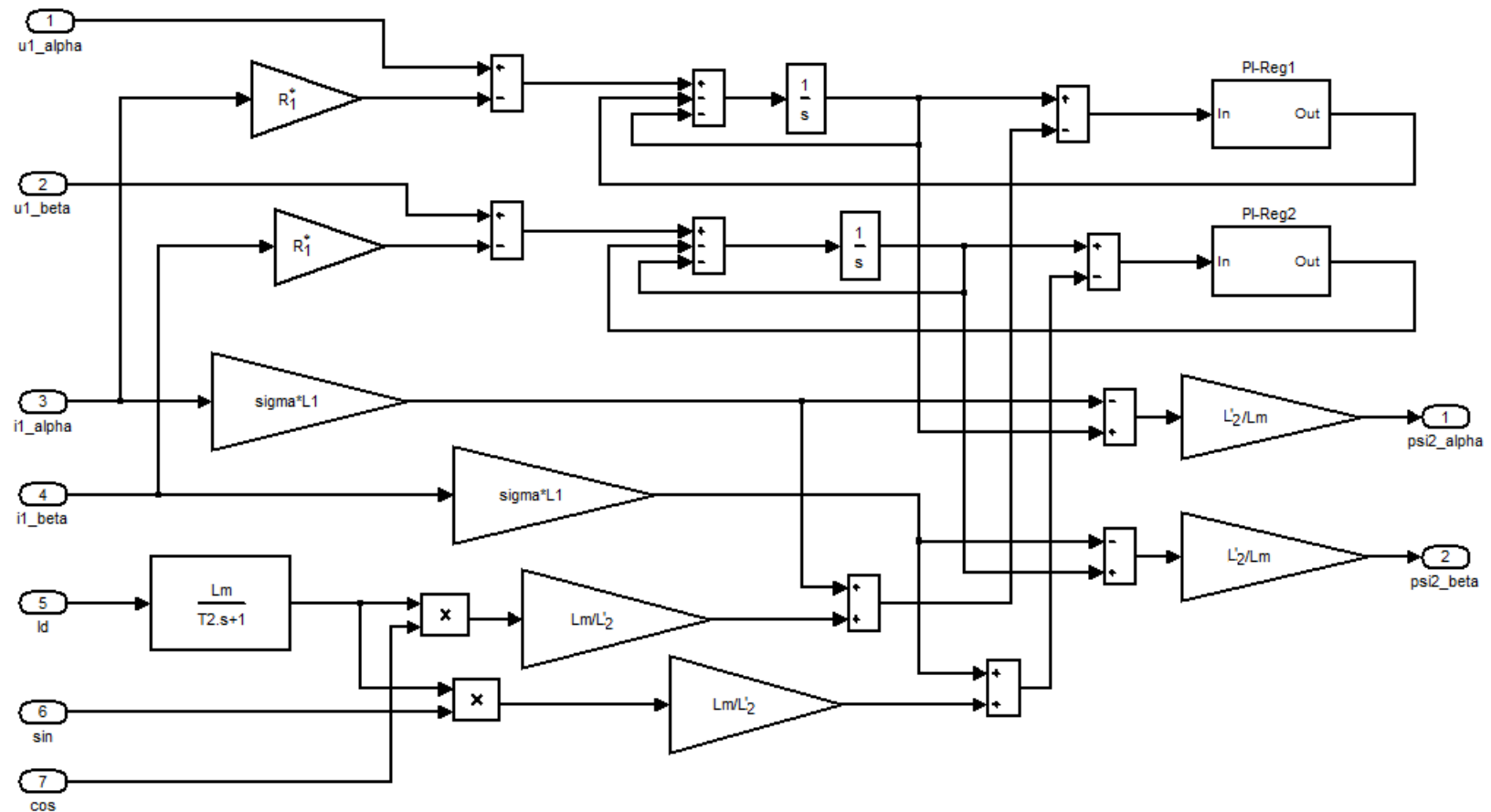
Схемы рекомендованных в [20 и 21] простейших адаптивных наблюдателей потока приведены на рисунках 5.11 и 5.12. Первый из них реализован с применением модели ротора без использования значений скорости вращения двигателя. Во втором используется модель ротора, приведенная на рисунке 5.9, а и требующая для работы наблюдателя знание скорости вращения двигателя. В приведенных адаптивных наблюдателях модель ротора считается эталонной, а модель статора является адаптируемой по потоку под модель ротора.

В общем случае для удовлетворительной работы системы управления электропривода без датчиков потока необходимо обеспечить высокое быстродействие наблюдателя потока, ограниченное быстродействие контура регулирования потока и плавное изменение скорости двигателя. Поэтому временной интервал расчета адаптивного наблюдателя потока должен выбираться из условия $T_{к.набл\Psi} = T_{к.т}$, а управление электроприводом желательно осуществлять от датчика интенсивности скорости.

Для настройки ПИ-регуляторов адаптации наблюдателя потокосцепления ротора выбираются следующие значения параметров:

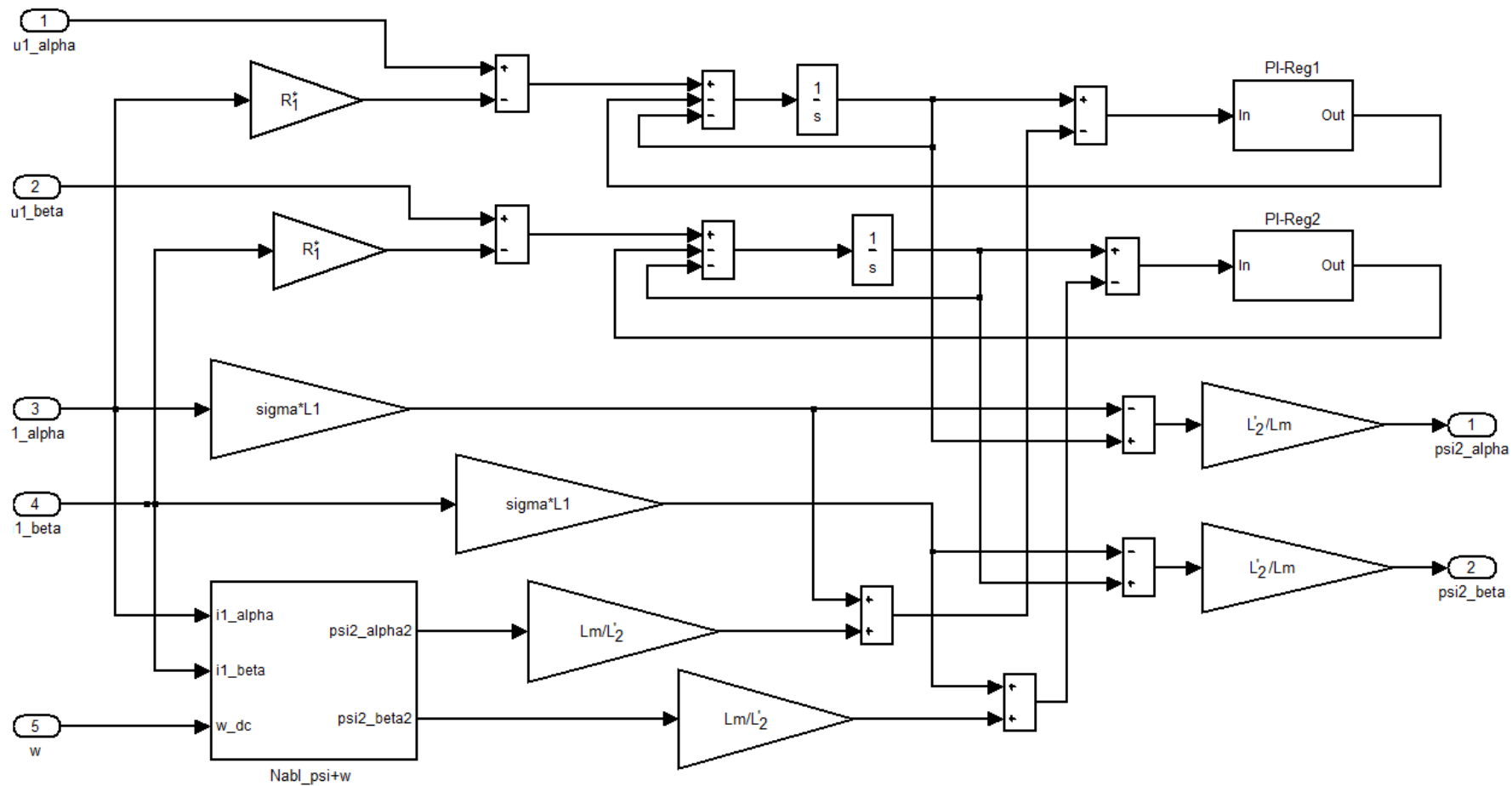
- постоянная времени $T_{рег.набл\Psi} = T_2$, с;
- коэффициент усиления $k_{рег.набл\Psi} = 10 \cdot k_{р\Psi}$;
- временной интервал расчета $T_{к.набл\Psi} = T_{к.т}$ при условии

$$T_{к.набл\Psi} \leq \frac{T_2}{2 \cdot k_{рег.набл\Psi}}.$$



i

Рисунок 5.11. Модель адаптивного наблюдателя потока без использования значения скорости вращения двигателя



i

Рисунок 5.12. Модель адаптивного наблюдателя потока с использованием значения скорости вращения двигателя

На рисунке 5.13 приведены диаграммы токов, электромагнитного момента и скорости двигателя в электроприводе с адаптивным наблюдателем потока без использования значений скорости двигателя, полученные при $T_{к.набл\psi} = 0.0002$ с и настройке на меньшее быстродействие контуров тока I_{1d} и потока: $T_{зу.ид} = T_{шим}$, $n_{Td} = 2$, $T_{к.\psi} = T_{\psi_{2d}} = 0.002$ с, $n_{\psi} = 2$.

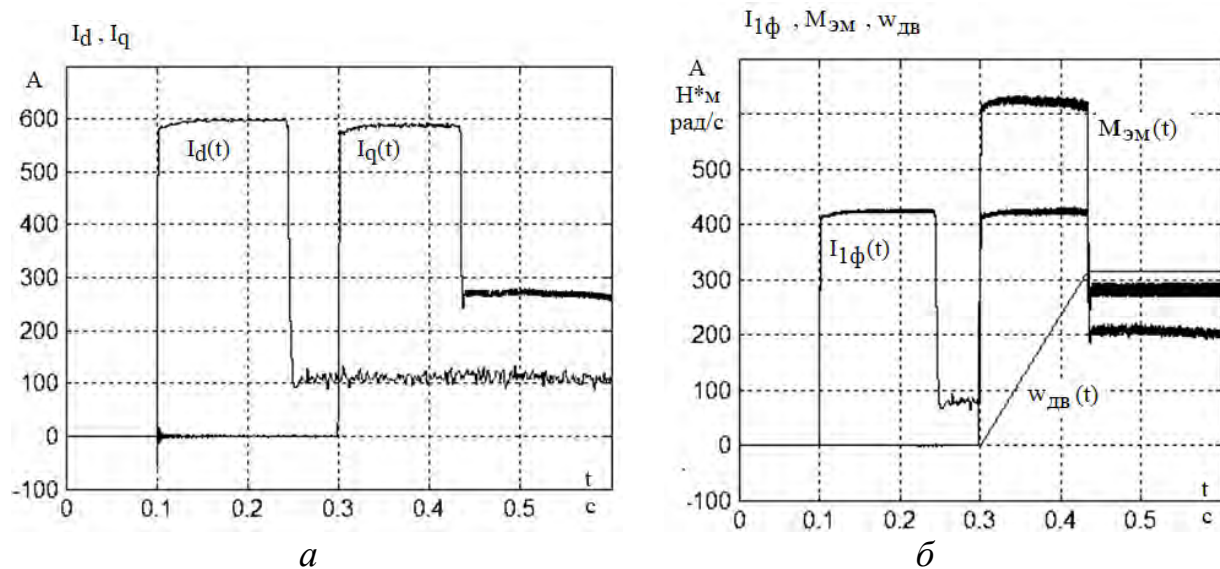


Рисунок 5.13. Диаграммы токов, момента и скорости двигателя в электроприводе с адаптивным наблюдателем потока рисунка 5.12

Реализация, как простейших, так и адаптивных наблюдателей потока требует знания параметров исполнительного двигателя и возможного температурного изменения сопротивлений обмоток статора и ротора. При постоянных принятых значениях сопротивлений двигателя их фактическое увеличение приводит к существенному увеличению, а уменьшение – к ослаблению фактического потока двигателя. Это вызывает соответствующие изменения момента и ЭДС вращения двигателя.

На рисунке 5.14 приведены диаграммы тока, электромагнитного момента и скорости двигателя, полученные при изменении сопротивлений двигателя относительно принятых при настройке системы управления электропривода с простейшим наблюдателем потока, требующим знание скорости вращения двигателя. Адаптивные наблюдатели не обеспечивают заметных преимуществ работы наблюдателя при переменных значениях сопротивлений двигателя.

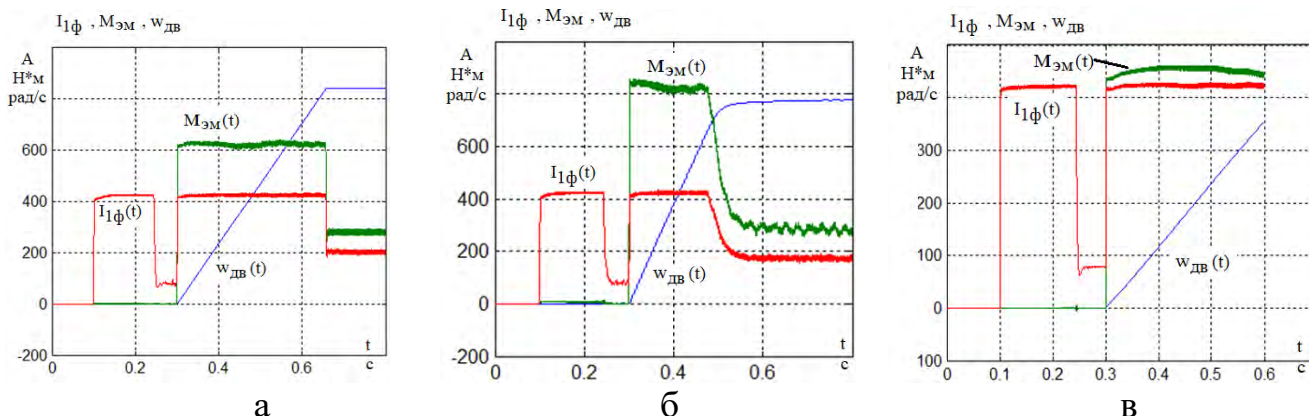


Рисунок 5.14. Работа электропривода в зависимости от изменения сопротивлений двигателя: *а* – точные значения; *б* – увеличены в 1.5 раза; *в* – уменьшены в 1.5 раза

Для регулятора потокосцепления могут быть использованы схемы цифровых ПИ-регуляторов с постоянным ограничением выходного сигнала и отключением (см. рисунок 3.4, *а* в разделе 3) или управлением (см. рисунок 3.4, *б* в разделе 3) интегральной составляющей в режиме насыщения. Схема ПИ-регулятора потокосцепления ротора приведена на рисунке 5.15. Коэффициент коррекции $k_{кор}$ интегральной составляющей в режиме насыщения находится из условия равенства интегральной составляющей в момент выхода регулятора из насыщения требуемому значению выходного сигнала в установившемся режиме работы. Работу ПИ-регулятора потокосцепления поясняют, приведенные на рисунке 5.16 диаграммы изменения: 1 – пропорциональной, 2 – интегральной составляющей и 3 – ограниченного по модулю результирующего сигнала регулятора.

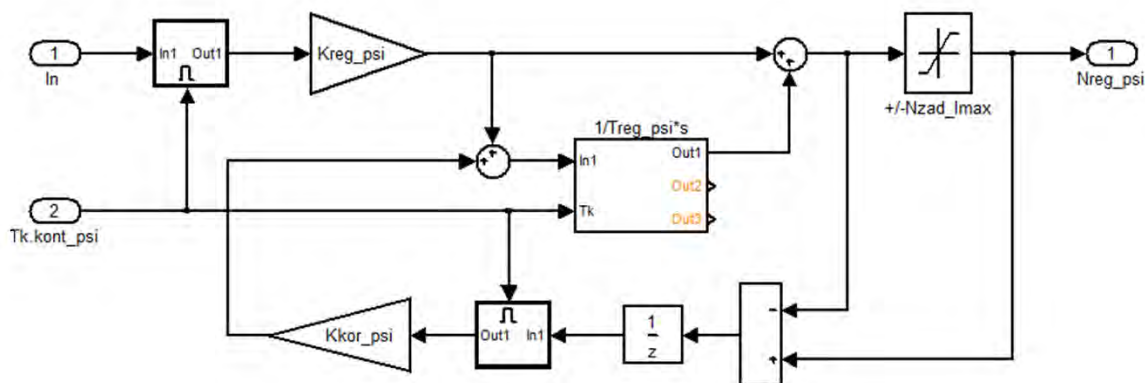


Рисунок 5 15 – ПИ-регулятор потокосцепления ротора с управлением интегральной составляющей и постоянным ограничением выходного сигнала

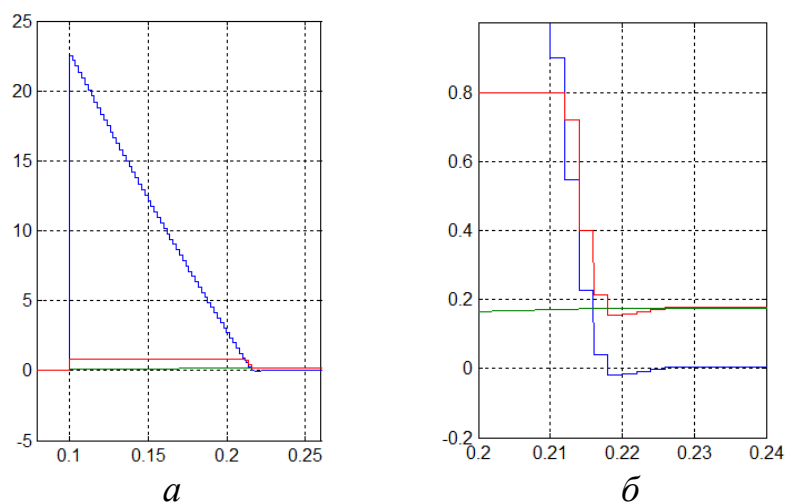


Рисунок 5.16. Работа ПИД-регулятора потокосцепления в режиме насыщения

Цифровые регуляторы потокосцепления с управляемой интегральной составляющей при соответствующей настройке позволяют обеспечить максимальное быстродействие и отсутствие перерегулирования отработки скачком заданного значения потока. Однако в электроприводе такая задача имеет место только при первом его включении и, следовательно, не является определяющей.

Исследования работы САР потока двигателя с учетом оценки качества работы контура скорости, проведены в разделе 6.

Выводы к разделу 5

1. САР потока не определяет динамические и статические показатели качества работы электропривода. Поэтому контур тока I_{1d} и, следовательно, контур потокосцепления ротора Ψ_{2d} , принципиально могут быть настроены на меньшее быстродействие, чем контур тока I_{1q} , и контур скорости электропривода. Однако характеристики системы измерения или расчета потока двигателя могут в значительной степени оказывать влияние на достижимые динамические показатели работы электропривода.

2. При наличии датчиков потока следует принимать разрядность АЦП $n_{\text{ацпд}\Psi} \geq 12$, а период оцифровки результатов измерения $T_{\text{к.д}\Psi} = T_{\text{к.т}}$ из-за ограничений, накладываемых со стороны расчета угла $\varphi_{\text{кс}}$. Настройка и быстродействие контура потока определяются в этом случае выбранным значением $T_{\text{к.}\Psi} \geq T_{\text{к.д}\Psi}$. Значение $n_{\text{ацпд}\Psi} < 12$ приводит к значительным пульсациям тока двигателя и требует дополнительного снижения быстродействия контуров потока и тока I_{1d} .

3. В электроприводе без датчиков потока двигателя в качестве наблюдателей потока целесообразно принимать простейший наблюдатель на основе модели ротора. Для такого наблюдателя необходимо знание скорости вращения двигателя. Период расчета наблюдателя должен быть равен периоду расчета в контурах тока

$T_{\text{к.набл}\Psi} = T_{\text{к.т}}$. Если обеспечить равенство интервала оцифровки скорости и периода расчета наблюдателя $T_{\text{к.набл}\Psi} = T_{\omega \text{набл}} = T_{\text{к.т}}$, тогда при разрядности значений скорости $n_{\omega \text{набл}} \geq 12$ возможна настройка контуров потока и тока I_{1d} на максимальное быстродействие.

4. В электроприводе без датчиков потока двигателя возможно применение адаптивных наблюдателей потока и в первую очередь с использованием скорости двигателя. Период расчета в адаптивном наблюдателе должен быть равен периоду расчета в контурах тока $T_{\text{к.набл}\Psi} = T_{\text{к.т}}$. Применение адаптивных наблюдателей принципиально требует снижения быстродействия контуров потока и тока I_{1d} .

5. Наблюдатели потока требуют знания параметров двигателя и их изменения в процессе работы (прежде всего сопротивлений обмоток статора и ротора).

Раздел 6. Настройка и исследование контура скорости асинхронного электропривода с частотным векторным управлением

Контур скорости является внешним контуром в двухконтурной системе регулирования скорости (САР скорости) вращения асинхронного двигателя в электроприводе с частотным векторным управлением (рисунок 6.1). Внутренним контуром САР скорости является контур регулирования тока I_{1q} эквивалентного двухфазного асинхронного двигателя во вращающейся системе координат d, q (рисунок 2.1).

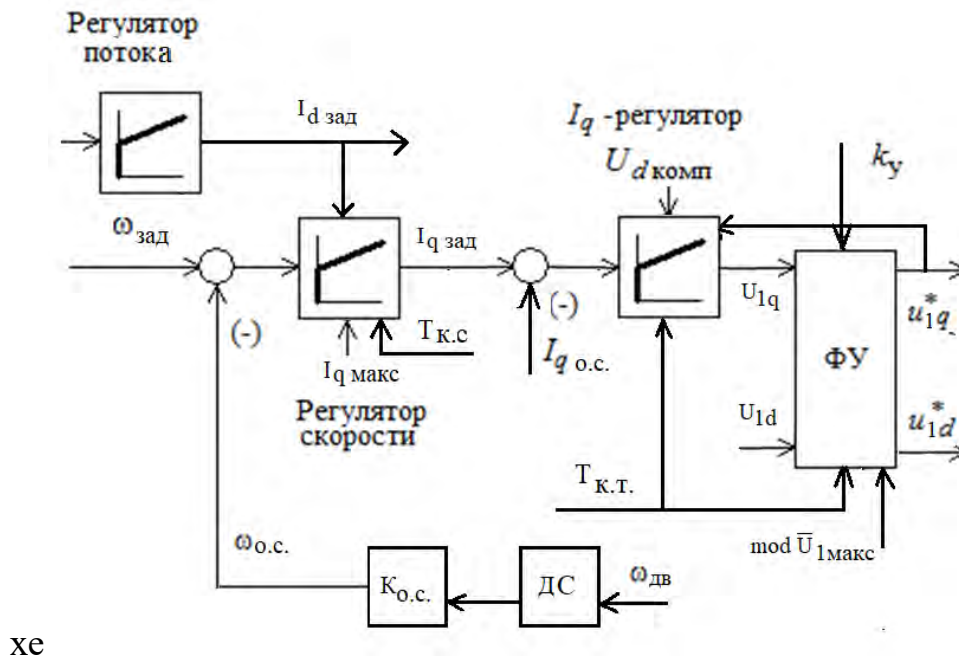


Рисунок 6.1. Функциональная схема контура скорости

Задачей САР скорости является формирование заданной временной диаграммы изменения скорости вращения двигателя в переходных режимах и поддержание её заданного постоянного значения в установившихся режимах. САР скорости определяет статические и динамические показатели качества работы регулируемого электропривода. Измерение скорости вращения двигателя осуществляется с помощью аналоговых и импульсных датчиков, например, соответственно, тахогенераторов постоянного тока и преобразователей угловых перемещений. Значение скорости двигателя $\omega_{\text{дв}}$ используется в цепи обратной связи контура регулирования скорости, а так же в наблюдателях потока, использующих значение скорости для расчета потоков $\Psi_{2\alpha}$, $\Psi_{2\beta}$ по осям α , β модели двухфазного двигателя (рисунок 2.5).

Оценка требований к параметрам расчета скорости вращения двигателя осуществлялась методом компьютерного моделирования в среде *MATLAB* + *Simulink*. Исследования проводились на модели асинхронного электропривода с электродвигателем серии AB250S6 ($U_{1\text{н}} = 380 \text{ В}$, $P_{\text{н}} = 45 \text{ кВт}$, $n_{\text{н}} = 984 \text{ об/мин}$,

$I_{1фн} = 87.2 \text{ А}$, $M_H = 436.7 \text{ Н} \cdot \text{м}$) и частотным векторным управлением. Модель электропривода разработана в соответствии с рекомендациями, приведенными в [20 и 21], и учитывает широтно-импульсную модуляцию выходного напряжения инвертора с частотой $f_{\text{ШИМ}} = 5000 \text{ Гц}$. Контуры тока настроены при интервале квантования $T_{к.т} = T_{\text{ШИМ}} = 0.0002 \text{ с}$ на максимальное быстродействие: $T_{з.и} = 0$, $n_T = 1$. Контур потока с аналоговым датчиком $n_{\text{ацпд}\Psi} = 16$, $T_{к.д\Psi} = T_{к.т}$ так же настроен на максимальное быстродействие при выборе $T_{к.\Psi} = T_{к.т}$. В качестве датчика скорости принят аналоговый датчик с параметрами: $n_{\text{ацп.дс}}$ – разрядность; $T_{к.дс}$ – временной интервал оцифровки АЦП датчика. Аналоговый датчик скорости измеряет мгновенное значение скорости в момент оцифровки АЦП

$$N_{\omega i} = \omega_i \cdot \frac{0.5 \cdot 2^{n_{\text{ацп.дс}}}}{\omega_{\text{изм.макс}}}.$$

Исходные параметры для расчета и настройки контура скорости: R_1^* (с учетом соединительных проводов), R'_2 , L_m , L_1 , L'_2 , σ , T_2 , z_p – параметры двигателя и структурной схемы двигателя; $\Psi_{2н}$ – номинальное значение потокосцепления ротора, Вб; J_ω – приведенный к валу двигателя эквивалентный момент инерции электропривода, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; $I_{1ф\text{макс}}$ – максимальный фазный ток двигателя в режимах пуска и торможения, А; $\omega_{\text{эп.макс}}$ – максимальная заданная скорость электропривода, рад/с; k_T – коэффициент обратной связи по току, 1/А; $T_{\text{ит}q\omega}$ – эквивалентная малая постоянная времени контура тока I_{1q} , с.

Общие принятые условия настройки контура скорости: $T_{к.с} = T_{\text{пк.с}} \geq T_{к.тq}$; $T_{\text{ос.с}} \leq T_{\text{пк.с}}$; $T_{к.дс} \leq T_{\text{ос.с}}$, где $T_{\text{пк.с}}$, $T_{\text{ос.с}}$ и $T_{к.с}$ – временные интервалы квантования сигналов в прямом канале, в цепи обратной связи и его результирующее значение в контуре скорости.

Расчет параметров аналогового датчика скорости:

– максимальное измеряемое значение скорости

$$\omega_{\text{изм.макс}} \geq 1.2 \cdot \omega_{\text{эп.макс}}, \text{ рад/с};$$

– коэффициент передачи датчика

$$k_{\text{дс}} = \frac{0.5 \cdot 2^{n_{\text{ацп.дс}}}}{\omega_{\text{изм.макс}}}, \text{ с/рад};$$

– масштабирующий коэффициент преобразования выходного сигнала датчика скорости

$$k_{\omega \text{ дс}} = \frac{\omega_{\text{изм.макс}}}{0.5 \cdot 2^{n_{\text{ацп.дс}}}} \text{ рад/с}.$$

Расчет параметров настройки контура скорости:

– коэффициент согласования сигнала обратной связи на входе регулятора скорости

$$k_{oc.c} = \frac{N_{oc.c \text{ макс}}}{\omega_{изм.макс}},$$

где $N_{oc.c \text{ макс}}$ – максимальное значение сигнала обратной связи, задается в абсолютных, например $N_{oc.c \text{ макс}} = \omega_{изм.макс}$, или относительных, например $N_{oc.c \text{ макс}} = 1$, единицах;

– коэффициент обратной связи по скорости

$$k_c = \frac{N_{oc.c \text{ макс}}}{\omega_{изм.макс}};$$

– максимальное значение задания скорости на входе контура

$$N_{зс.макс} = k_c \cdot \omega_{эп.макс};$$

– эквивалентная малая постоянная времени контура скорости

$$T_{\mu c \varepsilon} = T_{тq} + \frac{T_{пк.с}}{n_c} + T_{ф.ос}, \text{ с},$$

где $T_{тq} = 2 \cdot T_{\mu т q \varepsilon}$ – эквивалентная постоянная времени замкнутого контура тока I_{1q} , $n_c = (1 \div 3)$ – коэффициент аппроксимации звеньев с чистым запаздыванием в контуре скорости эквивалентным апериодическим звеном, $T_{ф.ос}$ – постоянная времени в цепи аналогового датчика скорости;

– постоянная времени регулятора скорости

$$T_{рс} = 4 \cdot T_{\mu c \varepsilon}, \text{ с};$$

– коэффициент усиления регулятора скорости

$$k_{рс} = \frac{J_{\varepsilon} \cdot k_T}{\Psi_{2н} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L'_2} \cdot z_p \cdot k_c \cdot 2 \cdot T_{\mu c \varepsilon}};$$

– допустимое значение выходного сигнала регулятора скорости

$$N_{рс. доп} = \sqrt{N_{зт.макс}^2 - N_{р\psi}^2},$$

где $N_{зт.макс} = k_T \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1ф \text{ макс}}$ – максимальное значение задания тока;

– постоянная времени фильтра на входе контура скорости

$$T_{ф.вх} = T_{рс} \div (T_{рс} + \frac{T_{пк.с}}{n_c} + T_{ф.ос}), \text{ с}.$$

Быстродействие контура скорости определяется значением интервала квантования $T_{пк.с}$ и достигается при равных значениях интервалов квантования сигналов в контуре скорости и тока I_{1q} . При коэффициенте $n_c = 2$ настройка контура близка к настройке на МО контура третьего порядка. Фильтр на входе контура скорости требуется для уменьшения перерегулирования при отработке

малых ступенчатых входных сигналов при отсутствии датчика интенсивности скорости.

Первоначально параметры аналогового датчика скорости приняты постоянными: $n_{\text{ацпдс}} = 16$, $T_{\text{к.дс}} = T_{\text{шим}} = 0.0002 \text{ с}$, а контур скорости настроен на максимальное быстродействие: $T_{\text{пк.с}} = T_{\text{к.т}}$, $T_{\text{ос.с}} = T_{\text{к.дс}}$, $n_{\text{ос.с}} = n_{\text{ацпдс}}$ и $T_{\text{ф.ос}} = 0$. В процессе исследований отдельно изменялись интервал оцифровки $T_{\text{ос.с}}$ и разрядность $n_{\text{ос.с}}$ сигнала обратной связи контура скорости.

Прежде всего, были получены приведенные на рисунке 6.2 диаграммы тока $I_{1\phi}(t)$, электромагнитного момента $M_{\text{эм}}(t)$ и скорости $\omega_{\text{дв}}(t)$ двигателя в режиме формирования потока и последующей отработки заданного значения скорости электропривода при начально принятых параметрах настройки. Принятые масштабы на рисунках: $m_{I_{1\phi}} = 2$, $m_M = 0.5$, $m_{\omega} = 10$.

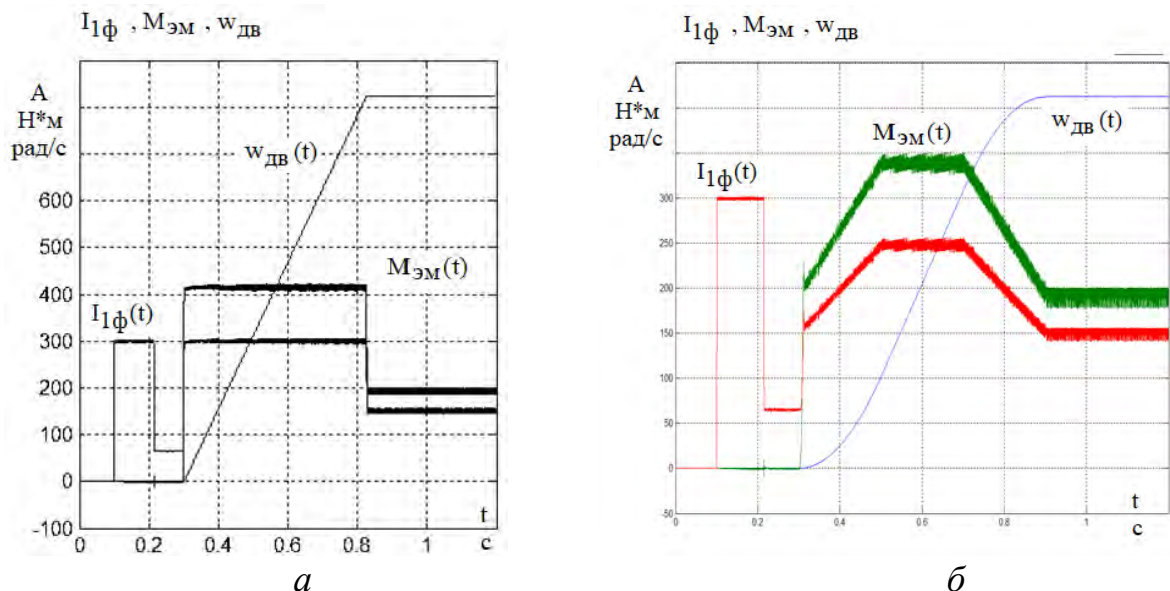


Рисунок 6.2. Диаграммы тока, момента и скорости двигателя при начально принятых параметрах настройки: *а* – скачок задания скорости; *б* – управление от датчика интенсивности скорости

Предельное значение быстродействия САР скорости определяется значением постоянной времени контуре тока I_{1q} и достигается при выборе $T_{\text{к.с}} = T_{\text{к.тq}}$.

Увеличение интервала квантования $T_{\text{ос.с}}$ сигнала скорости в цепи обратной связи требует изменения настройки контура скорости в соответствии с условием $T_{\text{пк.с}} \geq T_{\text{ос.с}}$ и приводит к уменьшению быстродействия контура. При условии $T_{\text{к.с}} = T_{\text{ос.с}}$ контур скорости может быть настроен при выборе временного интервала квантования в широких пределах от $T_{\text{к.с}} = 0.004 \text{ с}$ до $T_{\text{к.с}} = T_{\text{к.т}}$ или $T_{\text{к.с}} = 0.5 \cdot T_{\text{к.т}}$ (диапазон частот квантования в контуре от 250 Гц до $2f_{\text{шим}}$).

Диаграммы тока, электромагнитного момента и скорости двигателя, полученные при интервале квантования сигнала обратной связи $T_{oc.c} = 0.002$ с и соответствующей настройке контура скорости, приведены на рисунке 6.3, а.

При уменьшении разрядности $n_{oc.c} < 14$ сигнала обратной связи скорости возрастают пульсации токов I_{1q} , $I_{1\phi}$ и момента $M_{эм}$. Диаграммы тока, момента и скорости двигателя, полученные при $n_{oc.c} = 12$ без изменения первоначальной настройки контуров САР скорости, приведены на рисунке 6.3, б.

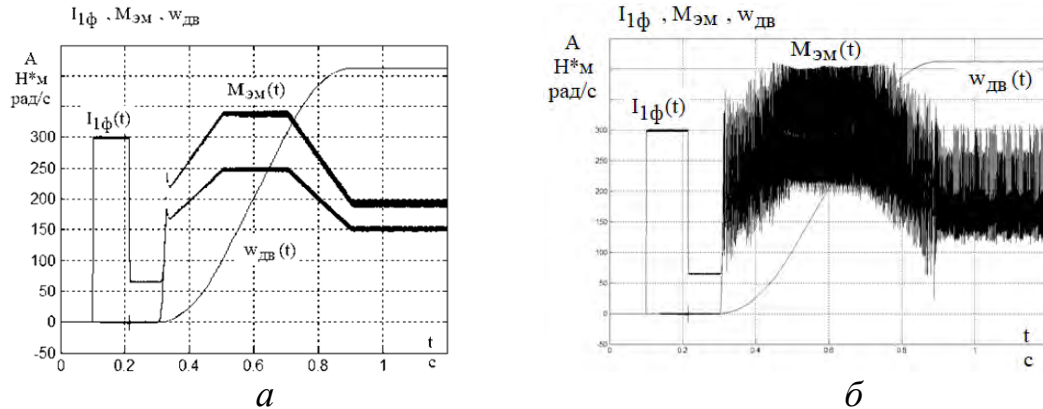


Рисунок 6.3. Диаграммы тока, момента и скорости двигателя в зависимости от параметров сигнала обратной связи по скорости: а – $T_{oc.c} = 0.002$ с, $n_{oc.c} = 16$; б – $n_{oc.c} = 12$, $T_{oc.c} = 0.0002$ с

Улучшение формы тока I_{1q} и, следовательно, тока и электромагнитного момента двигателя при малых значениях $n_{oc.c}$ возможно только при одновременном уменьшении быстродействия контуров скорости и тока I_{1q} . На рисунке 6.4 приведены диаграммы токов I_{1d} , I_{1q} , тока, момента и скорости двигателя, полученные при $n_{oc.c} = 12$ и настройке контуров тока I_{1q} и скорости на меньшее быстродействие: $T_{зу.и q} = T_{шим}$, $n_{т q} = 2$, $T_{oc.c} = 0.002$ с, $n_c = 2$.

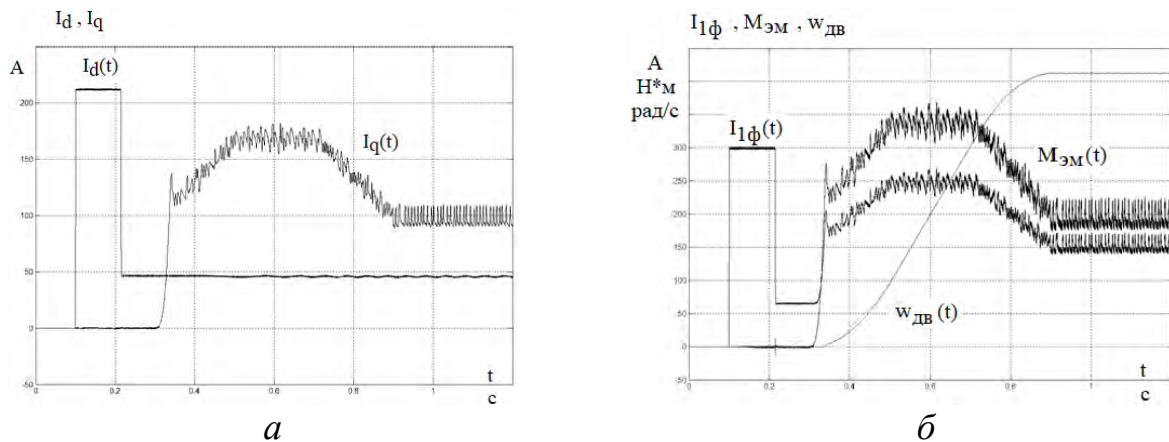


Рисунок 6.4. Диаграммы токов, момента и скорости двигателя при $n_{oc.c} = 12$ и уменьшенном быстродействии контуров САР скорости

Дальнейшее улучшение формы тока и момента двигателя возможно путем выбора $n_{oc.c} > 12$ или дальнейшего уменьшения быстродействия контуров скорости и тока I_{1q} . На рисунке 6.5 приведены диаграммы тока, электромагнитного момента и скорости двигателя, полученные при $n_{oc.c} = 14$ и прежней настройке контуров САР скорости.

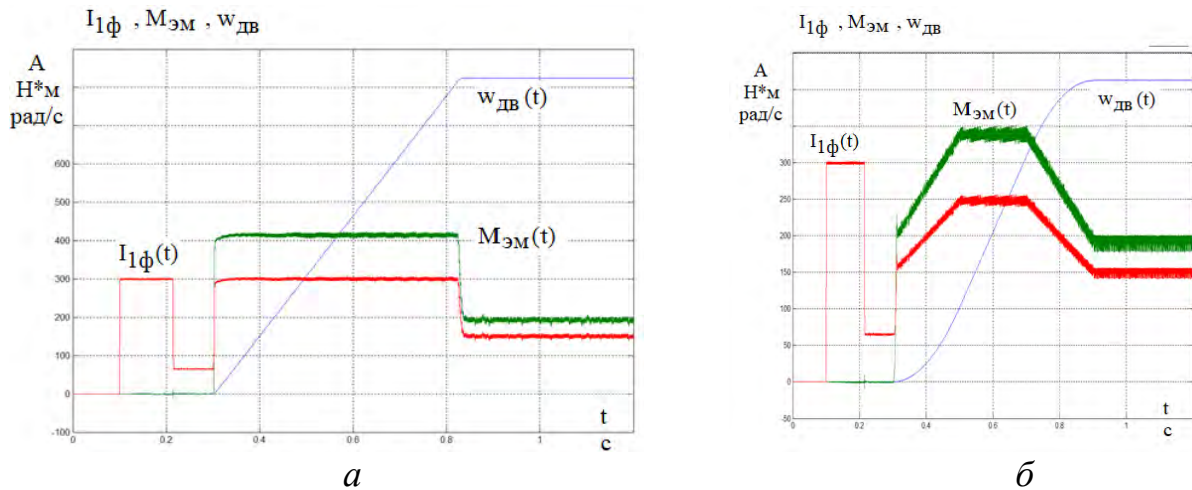


Рисунок 6.5. Диаграммы тока, электромагнитного момента и скорости двигателя при $n_{oc.c} = 14$ и уменьшенном быстродействии контуров САР скорости

Вывод 1. В системах электропривода с аналоговыми датчиками потока и скорости двигателя может быть достигнуто предельное быстродействие, определяемое значением $T_{к.т}$, если выполнить условия: $n_{ацпд\psi} \geq 12$ и $T_{к.д\psi} = T_{к.т}$, $n_{ацпдс} \geq 14$ и $T_{к.дс} = T_{к.т}$. При выборе $n_{ацпдс} < 14$ или $T_{к.дс} > T_{к.т}$ максимальное быстродействие электропривода полностью определяется параметрами датчика скорости.

При отсутствии датчиков потока потокосцепление двигателя рассчитывается с помощью простых и адаптивных наблюдателей потока с использованием или без использования значения скорости вращения двигателя (раздел 5):

- простой наблюдатель потока на базе модели ротора двигателя (рисунки 5.9, а);
- адаптивный наблюдатель потока без использования скорости вращения двигателя (рисунки 5.11);
- адаптивный наблюдатель потока с использованием скорости вращения двигателя (рисунки 5.12).

На рисунках 6.6 – 6.8 приведены диаграммы тока, электромагнитного момента и скорости двигателя, полученные в электроприводе с наблюдателями потока. Интервал расчета наблюдателей потока принят равным периоду расчета в контурах тока $T_{к.набл\psi} = T_{к.т}$. Параметры настройки контуров САР скорости и потокосцепления: $T_{к.т} = T_{зу.и} = T_{шим}$, $n_t = 2$, $T_{к.с} = T_{к.\psi} = 0.002$ с, $n_c = n_\psi = 2$, разрядность АЦП датчика скорости $n_{ацпдс} = 14$. Для простого (рисунок 6.6) и

адаптивного (рисунок 6.7) наблюдателей потока, использующих значение скорости двигателя, принят интервал оцифровки $T_{к.дс} = T_{шим} = 0.0002 \text{ с}$, для адаптивного наблюдателя без использования значения скорости (рисунок 6.8) – $T_{к.дс} = T_{к.с} = 0.002 \text{ с}$.

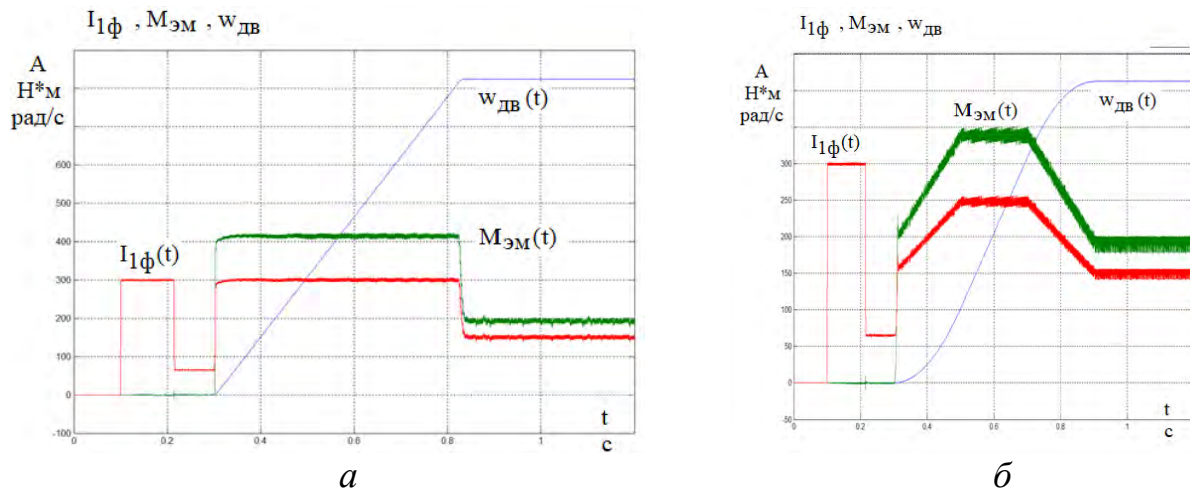


Рисунок 6.6. Диаграммы тока, момента и скорости двигателя с простым наблюдателем, использующим значение скорости: *а* – ступенчатый входной сигнал; *б* – управление от датчика интенсивности скорости

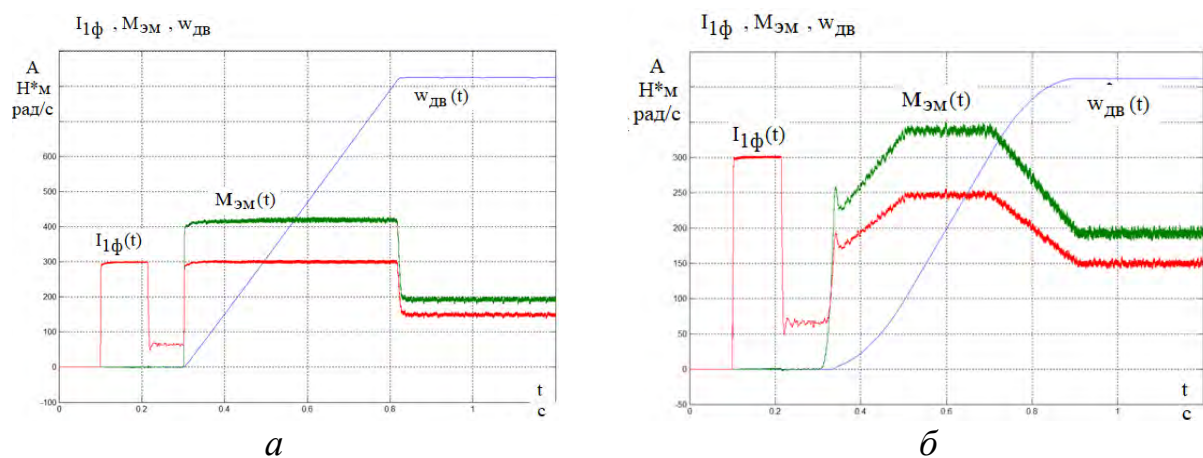


Рисунок 6.7. Диаграммы тока, момента и скорости двигателя с адаптивным наблюдателем, использующим значение скорости: *а* – ступенчатый входной сигнал; *б* – управление от датчика интенсивности скорости

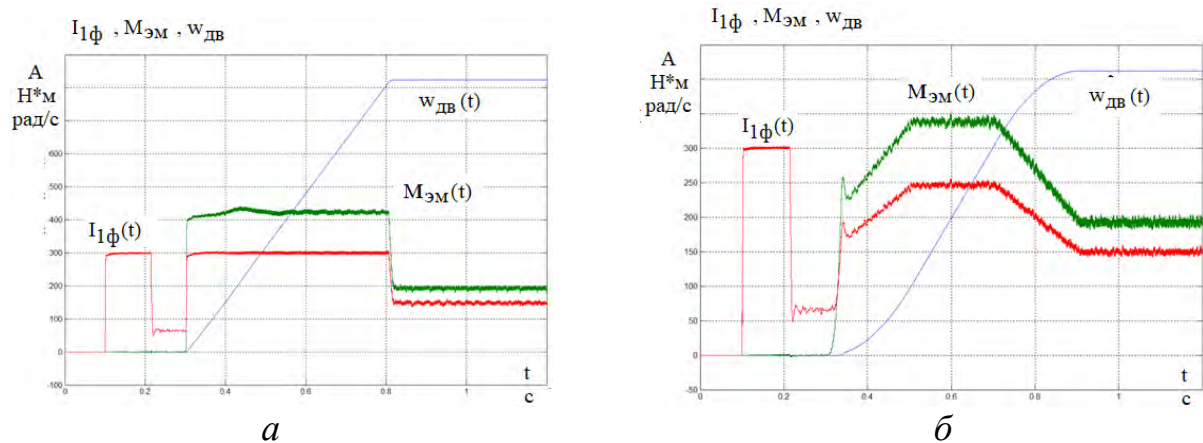


Рисунок 6.8. Диаграммы тока, момента и скорости двигателя, полученные с адаптивным наблюдателем, не использующим значение скорости: *а* – ступенчатый входной сигнал; *б* – управление от задатчика интенсивности скорости

Диаграммы рисунков 6.6 и 6.7 практически не отличаются от диаграмм рисунков 6.2 и 6.5, рассчитанных с датчиком потока двигателя. На рисунке 6.8 заметно отклонение диаграммам момента (*а*) и тока (*б*) от заданных значений, что объясняется ошибкой в поддержании фактического потока двигателя.

Вывод 2. В электроприводе с наблюдателями потока двигателя наилучшие результаты обеспечивает простой наблюдатель потока на основе модели ротора. При выполнении условий: $T_{к.набл\psi} = T_{к.т}$, $n_{ацпдс} \geq 14$ и $T_{к.дс} = T_{к.т}$ может быть достигнуто предельное быстродействие контура скорости при выбранном значении $T_{к.т}$. При выборе $n_{ацпдс} < 14$ или $T_{к.дс} > T_{к.т}$ максимальное быстродействие электропривода полностью определяется параметрами датчика скорости. Адаптивные наблюдатели принципиально требуют уменьшения быстродействия контуров САР скорости и потокосцепления двигателя.

Результаты исследования работы асинхронного электропривода, реализованного по схеме с простым наблюдателем потока на основе модели ротора, представлены в разделах 9, 10 и 12.

Для простейших механизмов со статическим моментом нагрузки реактивного характера, не требующих формирования момента в заторможенном состоянии двигателя, большого диапазона регулирования скорости и высокого быстродействия, возможно применение бездатчикового электропривода (электропривод без датчика скорости). В бездатчиковом электроприводе расчет значений скорости вращения, потоков по осям α, β двигателя и угла поворота координатной системы осуществляется адаптивным наблюдателем скорости. Простейший адаптивный наблюдатель скорости со сравнением потоков может быть реализован на основе модели статора (эталонная модель), представленной на рисунке 5.8 и модели ротора (адаптируемая модель), представленной на рисунке 5.9, *а*. Адаптация модели ротора осуществляется посредством скорости двигателя, формируемой ПИ-регулятором контура адаптации в соответствии с законом адаптации $\Psi_{2\alpha}^s \cdot \Psi_{2\beta}^r - \Psi_{2\beta}^s \cdot \Psi_{2\alpha}^r = 0$.

Однако принятие модели статора, которая не эффективна как простой наблюдатель потока, в качестве эталонной модели делает наблюдатель скорости не работоспособным. Проблема решается, если модель статора заменить адаптивным наблюдателем потока, схема которого представлена на рисунке 5.11 и который по своей сути является адаптированной моделью статора.

Схема модели адаптивного наблюдателя скорости приведена на рисунке 6.9. Наблюдатель формирует значение скорости двигателя $\omega_{\text{набл}}$, при которой достигается равенство потоков моделей статора и ротора $\Psi_{2\alpha}^s = \Psi_{2\alpha}^r = \Psi_{2\alpha}$, $\Psi_{2\beta}^s = \Psi_{2\beta}^r = \Psi_{2\beta}$. Найденное значение скорости двигателя используется в контуре скорости для реализации обратной связи без датчика скорости.

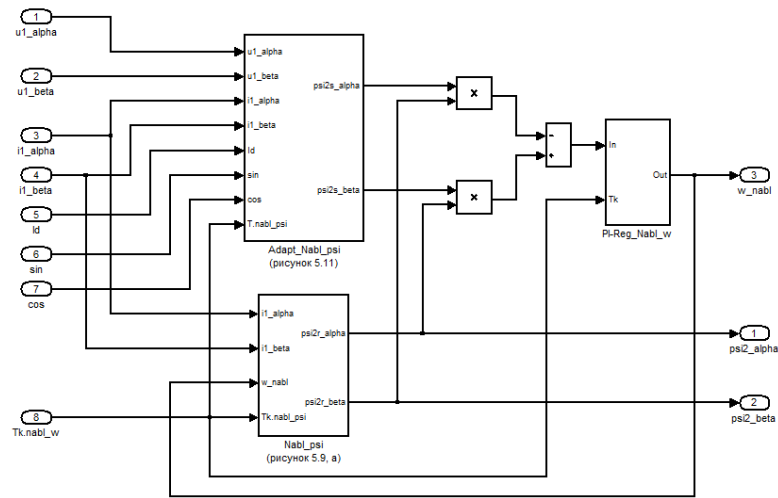


Рисунок 6.9. Схема модели адаптивного наблюдателя скорости

Расчет параметров настройки контура скорости без датчика:

– максимальное расчетное значение скорости

$$\omega_{\text{расч.макс}} \geq 1.2 \cdot \omega_{\text{ЭПмакс}}, \text{ рад/с;}$$

– коэффициент обратной связи по скорости и коэффициент согласования сигнала обратной связи на входе регулятора скорости

$$k_c = k_{\text{ос.с}} = \frac{N_{\text{ос.макс}}}{\omega_{\text{расч.макс}}}, \text{ с/рад}$$

и далее расчет ведется в соответствии с приведенной выше методикой.

Расчет параметров настройки контура адаптации адаптивного наблюдателя скорости с ПИ-регулятором:

– коэффициент усиления регулятора $k_{\text{рег.набл}\omega} = 10 \cdot k_{\text{рс}}$;

– малая постоянная времени контура $T_{\mu \text{набл}\omega} = \frac{T_2}{2 \cdot k_{\text{рег.набл}\omega}}$, с;

– постоянная времени регулятора $T_{\text{рег.набл}\omega} = 4 \cdot T_{\mu \text{набл}\omega}$, с;

– принимаем интервал расчета наблюдателя из условий

$$T_{\text{к.набл}\omega} \leq T_{\mu \text{набл}\omega}, \quad T_{\text{к.набл}\omega} \geq T_{\text{к.т}}.$$

В бездатчиковом электроприводе в цепи обратной связи по скорости устанавливается сглаживающий фильтр, постоянная времени которого выбирается из условия $T_{\text{ф.ос}}^* \geq 2 \cdot T_{\text{мсэ}}$. После установки фильтра требуется изменить настройку регулятора скорости:

$$T_{\text{мсэ}}^* = T_{\text{мсэ}} + T_{\text{ф.ос}}^*, \text{ с}; \quad T_{\text{рс}}^* = b_c \cdot a_c \cdot T_{\text{мсэ}}^*, \text{ с}; \quad k_{\text{рс}}^* = k_{\text{рс}} \cdot \frac{T_{\text{мсэ}}}{T_{\text{рс}}^* / (b_c \cdot a_c)}.$$

На рисунке 6.10 приведены диаграммы тока, момента и скорости двигателя, полученные в электроприводе с адаптивным наблюдателем скорости и параметрами настройки САР скорости и потока: $T_{\text{к.т}} = T_{\text{зу.и}} = T_{\text{шим}} = 0.0002 \text{ с}$, $n_{\text{т}} = 2$,

$$T_{\text{к.с}} = T_{\text{к.ψ}} = 0.002 \text{ с}, \quad n_{\text{с}} = n_{\text{ψ}} = 2, \quad T_{\text{к.набл.ω}} = 0.0002 \text{ с}.$$

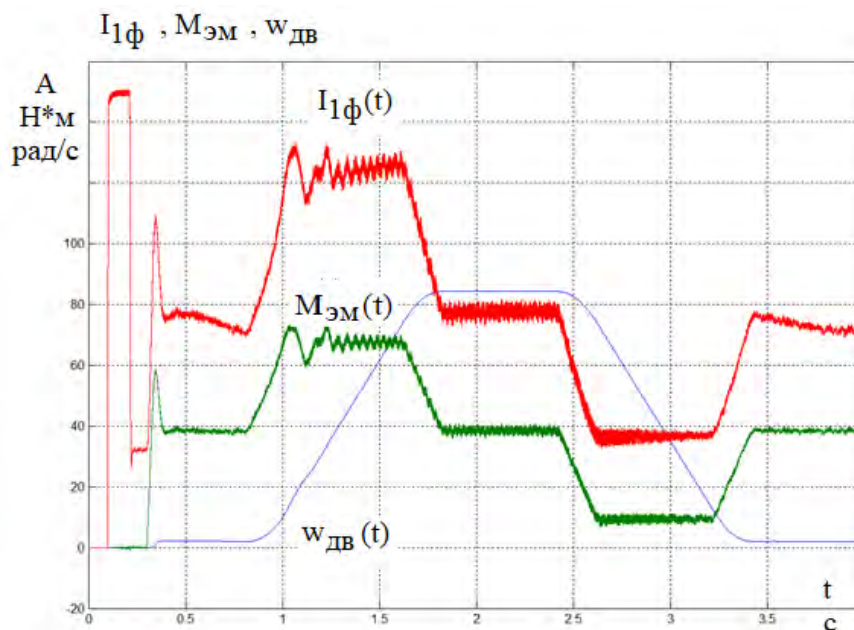


Рисунок 6.10. Диаграммы тока, электромагнитного момента и скорости двигателя, полученные в электроприводе без датчика скорости и с адаптивным наблюдателем скорости

Вывод 3. Бездатчиковый электропривод с адаптивным наблюдателем скорости, схема которого приведена на рисунке 6.9, может быть применен для механизмов с реактивным характером нагрузки. Временной интервал расчета наблюдателя скорости должен быть равен периоду расчета в контурах тока $T_{\text{к.набл.ω}} = T_{\text{к.т}}$. В бездатчиковом электроприводе невозможно обеспечить устойчивую работу при нулевой скорости, поэтому минимальное значение скорости электропривода следует выбирать из условия $|\omega_{\text{эп.мин}}| \geq 0.02 \cdot \omega_{\text{дв.н}}$.

Результаты исследования работы бездатчикового асинхронного электропривода представлены в разделе 11.

В электроприводе с датчиком скорости адаптивный наблюдатель скорости может быть использован как адаптивный наблюдатель потока. В этом случае в наблюдателе может использоваться сформированное датчиком скорости значение

скорости двигателя, а ПИ-регулятор наблюдателя будет формировать только корректирующее значение скорости $\Delta\omega_{\text{набл}} \approx 0$, поддерживая выполнение условий

$$\Psi_{2\alpha}^s = \Psi_{2\alpha}^r = \Psi_{2\alpha}, \quad \Psi_{2\beta}^s = \Psi_{2\beta}^r = \Psi_{2\beta}.$$

На рисунке 6.11 приведены диаграммы тока, электромагнитного момента и скорости двигателя, полученные в электроприводе с аналоговым датчиком скорости, адаптивным наблюдателем скорости в качестве наблюдателя потока и параметрами настройки контуров САР скорости и потока:

$$T_{\text{к.т}} = T_{\text{з.и}} = T_{\text{шим}} = 0.0002 \text{ с}, \quad n_{\text{т}} = 2, \quad T_{\text{к.}\Psi} = 0.002 \text{ с}, \quad T_{\text{к.с}} = T_{\text{к.дс}} = 0.002 \text{ с}, \\ n_{\text{с}} = n_{\Psi} = 2, \quad n_{\text{ацпдс}} = 14, \quad T_{\text{к.набл}\omega} = 0.0002 \text{ с}.$$

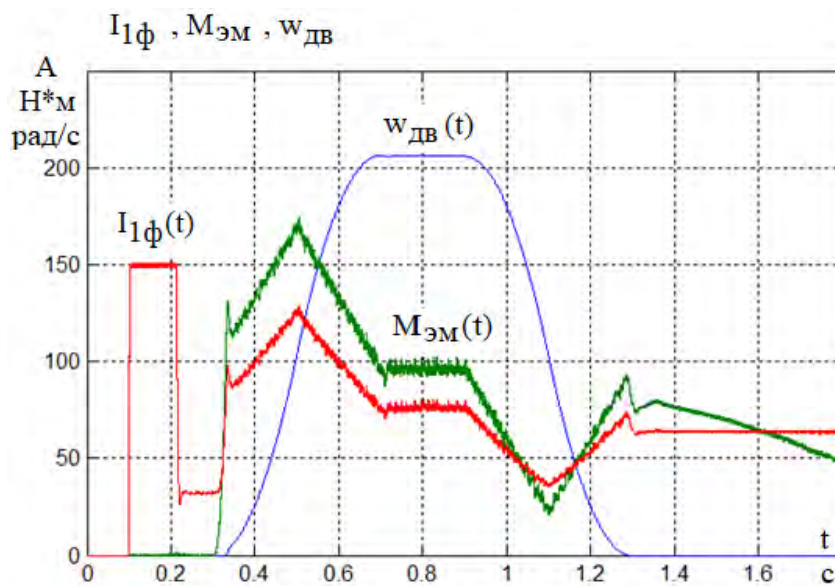


Рисунок 6.11. Диаграммы тока, момента и скорости двигателя, полученные в электроприводе с аналоговым датчиком скорости и адаптивным наблюдателем скорости в качестве наблюдателя потока

Вывод 4. Электропривод с адаптивным наблюдателем скорости может работать как с датчиком скорости, так и без него, например, в аварийном режиме.

В асинхронных электроприводах широко применяются импульсные датчики скорости вращения, в качестве которых используются преобразователи угловых перемещений с выходными сигналами прямоугольной формы. Число импульсов датчика за интервал времени измерения $T_{\text{к.дс}}$ определяет значение средней скорости вращения датчика $\omega_{\text{ср}i}$

$$N_{\omega i} = \Delta\varphi_i \cdot \frac{4 \cdot n_{\text{имп. дс}}}{2\pi} = \left(\int_{t_{i-1}}^{t_i} \omega(t) \cdot dt \right) \cdot \frac{4 \cdot n_{\text{имп. дс}}}{2\pi} = \omega_{\text{ср}i} \cdot T_{\text{к.дс}} \cdot \frac{4 \cdot n_{\text{имп. дс}}}{2\pi},$$

где $4 \cdot n_{\text{имп.дс}}$ — число импульсов выходного сигнала на оборот вала датчика с учетом учетверения.

Таким образом, импульсный датчик скорости измеряет среднее значение скорости за интервал измерения и с запаздыванием (переменным) относительно момента оцифровки.

Имитационная модель импульсного датчика реализована в соответствии с выражениями:

$$\omega_{ср i} = \frac{\omega_i + \omega_{i-1}}{2};$$

$$N_{\omega i} = \left(\frac{\omega_i + \omega_{i-1}}{2} \right) \cdot T_{к.дс} \cdot \frac{4 \cdot n_{имп.дс}}{2\pi} = \left(\frac{\omega_i + \omega_{i-1}}{2} \right) \cdot k_{имп.дс};$$

$$\omega_{дс i} = \frac{2\pi}{n_{имп.дс}} \cdot \frac{1}{T_{имп.дс}} \cdot N_{\omega i} = k_{\omega_{имп.дс}} \cdot N_{\omega i}, \text{ рад/с}$$

Импульсный датчик скорости эквивалентен аналоговому при выполнении равенства

$$N_{\omega}(\omega_{изм.макс}) = \frac{2^{n_{апп.дс}}}{2},$$

откуда находим условие эквивалентности датчиков

$$4 \cdot n_{имп.дс} = \frac{\pi \cdot 2^{n_{апп.дс}}}{T_{к.дс} \cdot \omega_{изм.макс}}.$$

Вывод 5. Импульсный датчик скорости вращения эквивалентен аналоговому датчику только при большом числе импульсов на оборот вала.

Расчет параметров импульсного датчика скорости:

– коэффициент передачи датчика

$$k_{имп.дс} = \frac{4 \cdot n_{имп.дс}}{2\pi} \cdot T_{к.дс};$$

– масштабирующий коэффициент преобразования выходного сигнала датчика

$$k_{\omega_{имп.дс}} = \frac{2\pi}{4 \cdot n_{имп.дс} \cdot T_{к.дс}}, \text{ рад/с}.$$

Расчет параметров настройки контура скорости с импульсным датчиком ведется в соответствии с приведенной выше методикой, где следует принять:

$$T_{мсэ} = T_{тq} + \frac{1.5 \cdot T_{пк.с}}{n_c} + T_{ф.ос}, \quad T_{к.дс} \leq T_{пк.с}, \quad T_{ф.ос} = 0.$$

На рисунке 6.12 приведены диаграммы тока, электромагнитного момента и скорости двигателя, полученные с импульсным датчиком скорости ($4 \cdot n_{имп.дс} = 4 \cdot 5000$), адаптивным наблюдателем скорости в качестве наблюдателя потока при тех же параметрах настройки контуров САР скорости и потока, что и для диаграмм рис 6.11.

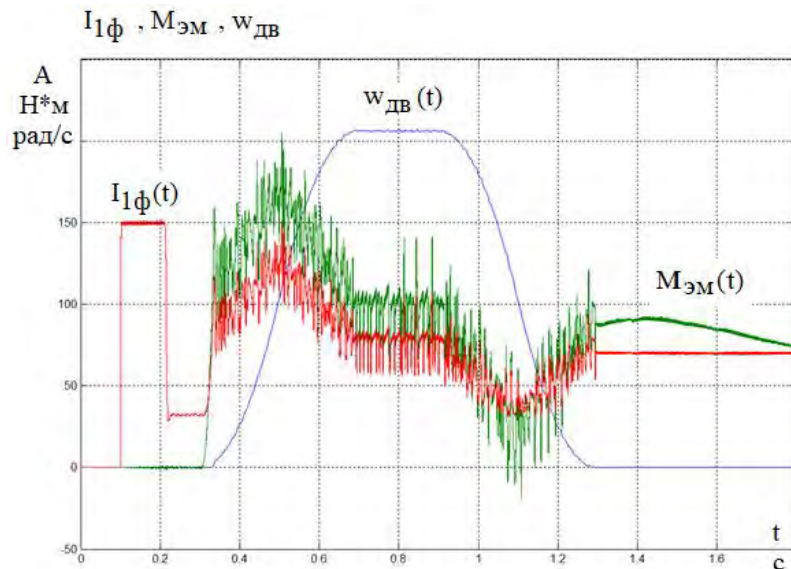


Рисунок 6.12. Диаграммы тока, момента и скорости двигателя, полученные с импульсным датчиком скорости и адаптивным наблюдателем скорости в качестве наблюдателя потока

Результаты исследования работы асинхронного электропривода с импульсным датчиком скорости представлены в разделах 9 – 12.

Ожидаемое качество работы контура скорости по управлению (с фильтром на входе) предварительно может быть оценено следующими показателями [2]:

- статическая ошибка по управлению $\Delta\omega_{\text{ст}} = 0$;
- перерегулирование при отработке ступенчатого сигнала зависит от настройки контура, но не превышает значения $\sigma = 10\%$;
- скоростная ошибка при отработке линейно изменяющегося сигнала

$$\Delta\omega_{\text{ск}} \approx 4 \cdot T_{\text{мсэ}} \cdot \left(\frac{d\omega}{dt} \right)_{\text{зад}}, \text{ рад/с};$$

- полоса пропускания при отработке синусоидального сигнала

$$\omega_{\text{п}} \geq \frac{0.36}{T_{\text{мсэ}}}, \text{ рад/с} \quad \text{или} \quad f_{\text{п}} \geq \frac{0.36}{2\pi \cdot T_{\text{мсэ}}}, \text{ Гц}.$$

При отсутствии фильтра на входе контура скорости перерегулирование и полоса пропускания могут достигать, соответственно, значений:

$$\sigma \geq 43\%; \quad \omega_{\text{п}} \geq \frac{0.59}{T_{\text{мсэ}}}, \text{ рад/с} \quad \text{или} \quad f_{\text{п}} \geq \frac{0.59}{2\pi \cdot T_{\text{мсэ}}}, \text{ Гц}.$$

Ожидаемые показатели качества работы контура скорости по возмущению:

- статическая ошибка по возмущению $\Delta\omega_{\text{в.ст}} = 0$;
- динамический провал (всплеск) скорости при ступенчатом изменении момента нагрузки $\pm \Delta M_{\text{с}}$

$$\Delta\omega_{\text{в.макс}} \approx \mu \frac{1.75 \cdot T_{\text{мсэ}}}{J_{\text{э}}} \cdot \Delta M_{\text{с}}, \text{ рад/с}.$$

Динамические показатели контура скорости однозначно определяются значением его эквивалентной малой постоянной времени $T_{\text{мсэ}}$. При заданных

характеристиках электропривода, например, полосе пропускания, это позволяет определить требуемые параметры настройки контура скорости.

Для реализации регулятора скорости следует использовать схему ПИ-регулятора с управляемой интегральной составляющей в режиме насыщения (см. в разделе 3 рисунок 3.3, б). Схема ПИ-регулятора скорости с зависимым ограничением выходного сигнала от сигнала регулятора потока приведена на рисунке 6.13. Правильный подбор коэффициента коррекции $k_{кор}$ обеспечит максимальное быстродействие контура и отсутствие перерегулирования при отработке скачка задания скорости вне зависимости от значения заданной скорости и величины статического момента нагрузки электропривода.

Работу ПИ-регулятора скорости с управляемой интегральной составляющей в режиме насыщения поясняют, приведенные на рисунке 6.16 диаграммы изменения: 1 – пропорциональной и 2 – интегральной составляющей, 3 – ограниченного по модулю результирующего сигнала регулятора.

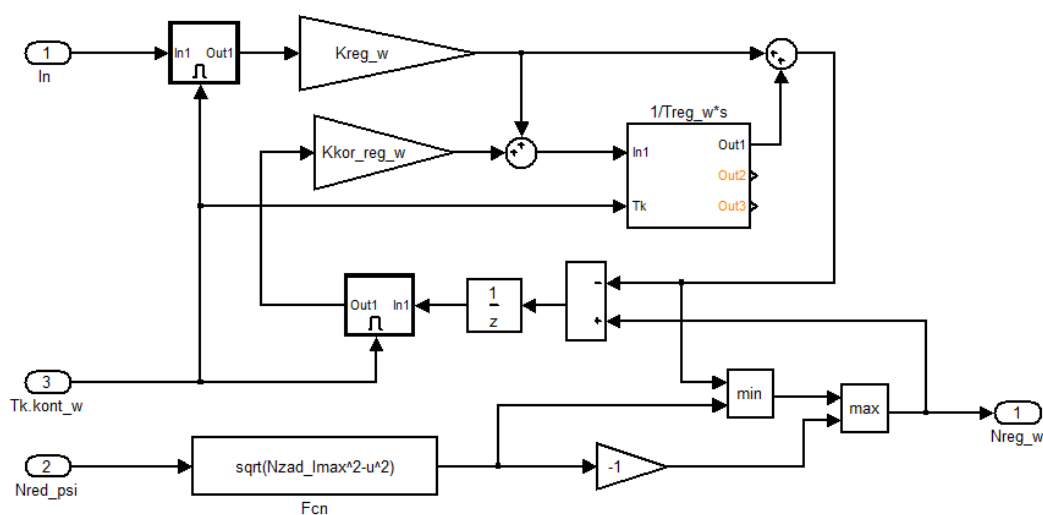


Рисунок 6.13. ПИ-регулятор скорости с управляемой интегральной составляющей и зависимым ограничением выходного сигнала

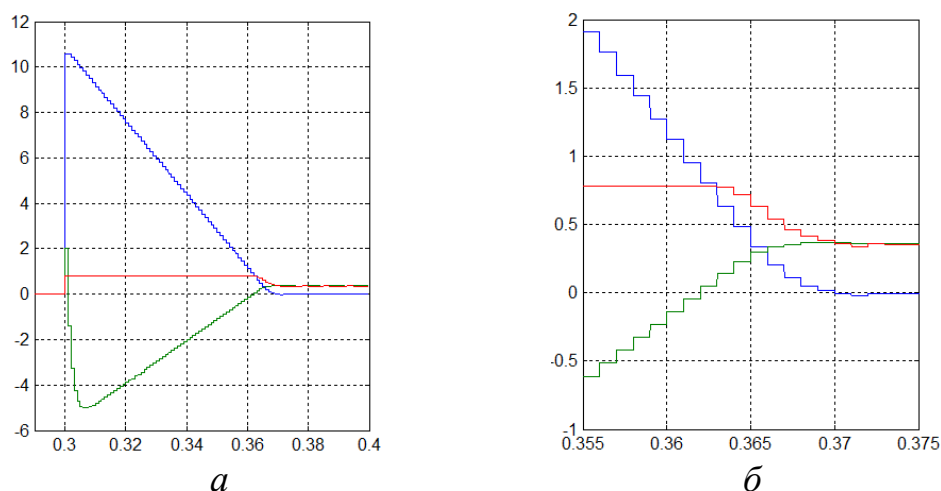


Рисунок 6.14. Диаграммы, поясняющие работу ПИ-регулятора рисунка 6.15 при отработке скачка задания скорости

Применение цифрового ПИ-регулятора с отключением интегральной составляющей (см. в разделе 3 рисунок 3.3, а) в качестве регулятора скорости требует дополнительного ограничения значения пропорциональной составляющей (рисунке 6.15). Величина ограничения пропорциональной составляющей определяется условием

$$P_{pc.макс} = \frac{I_{с макс}}{I_{1ф макс}} \cdot \frac{T_{pc}}{T_{пк.с}}.$$

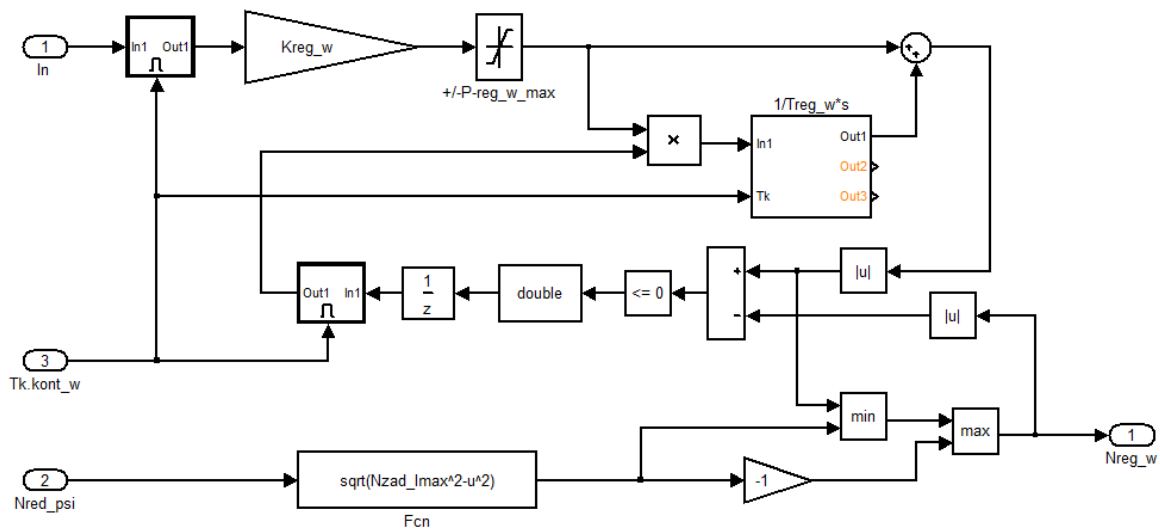


Рисунок 6.15. ПИ-регулятор скорости с отключением интегральной, ограничением пропорциональной составляющей и зависимым ограничением выходного сигнала

Общие выводы к разделу 6

1. Предельное быстродействие контура скорости определяется быстродействием контура тока I_{1q} – значением его эквивалентной малой постоянной времени $T_{\mu T q \varepsilon}$ (см. раздел 3). Период оцифровки $T_{к.д\psi}$ датчика или интервал расчета $T_{к.набл\psi}$ наблюдателя потока и период оцифровки $T_{к.дс}$ датчика скорости должны быть равны интервалу расчета в контурах тока. Разрядность выходных сигналов датчиков потока $n_{ацп.д\psi}$ не должна быть менее 12, а датчика скорости – 14. При выполнении этих условий в системе с датчиком потока или простым наблюдателем потока на основе модели ротора возможно достижение предельного быстродействия контура скорости.

2. Практически быстродействие контура скорости ограничено параметрами датчика скорости. Увеличение периода оцифровки, а так же уменьшение разрядности датчика скорости всегда приводит к необходимости уменьшения быстродействия контура скорости по причине роста пульсаций тока и момента двигателя. Применение адаптивных наблюдателей потока принципиально приводит к уменьшению быстродействия электропривода. Наилучшие результаты обеспечивают наблюдатели потока на основе модели ротора.

3. Настройка контуров САР потока на большее быстродействие относительно контуров САР скорости не оказывает влияние на характеристики электропривода и практически нецелесообразна.

Раздел 7. Параметры элементов силового канала

Параметры элементов силового канала электропривода считаются заданными. Справочные параметры двигателя и преобразователя выбираются по техническим справочникам и каталогам. Расчетные параметры двигателя, его схемы замещения и структурных схем двигателя рассчитываются по методикам, изложенным в источниках [20 и 21], и с помощью программы REP_AD_RL2.

Преобразователь частоты должен быть согласован по напряжению с одной стороны с питающей сетью, а с другой с асинхронным двигателем.

При выборе параметров электропривода должны быть выполнены следующие условия:

$$I_{1\phi н} \leq I_{и.длит.доп}; \quad I_{эп.макс} = I_{1\phi макс} \leq I_{и.макс}; \quad n_{эп.макс} \leq n_{дв.н}.$$

При выборе значения допустимой перегрузки электропривода можно ориентироваться на следующие значения $I_{эп.макс} = (1.5 \div 1.6) \cdot I_{и\phi н}$ или $M_{эп.макс} = 2 \cdot M_{дв.н}$. В последнем случае, как правило, требуется выбор преобразователя следующего габарита.

Преобразователь частоты подключается к питающей сети с номинальным напряжением $U_{сн}$ через согласующий трансформатор или реактор с параметрами: L_p – индуктивность, Гн, R_p – сопротивление, Ом, фазы трансформатора или реактора [20, 21].

Параметры сетевого трансформатора или реактора выбираются в соответствии с таблицей 7.1 [20, 21] по расчетному значению номинального тока обмотки фазы

$$I_{р\phi н} = I_{1\phi н} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot U_{1\phi н}}{U_c}, \text{ А.}$$

Таблица 7.1

$I_{р\phi н}, \text{ А}$	12.3	20.5	41	82	165	265	410	660	820
$L_p, \text{ мГн}$	3	2	1	0.5	0.25	0.156	0.1	0.064	0.05
$R_p, \text{ мОм}$	450	265	100	37	13	7.2	3.8	2.1	1.4
$I_{дн}, \text{ А}$	15	25	50	100	200	320	500	800	1000

Предельные изменения напряжения сети характеризуются значениями $U_{с мин}$ и $U_{с макс}$. Ёмкость конденсатора звена постоянного тока преобразователя частоты $C \approx (100 \div 300) \cdot P_{дв.н}$, мкФ, где $P_{дв.н}$ – номинальная мощность двигателя, кВт [20,21]. Сопротивление соединительных проводов двигателя $R_{пр} \approx (0.1 \div 0.2) \cdot R_1$. При напряжении питающей сети $U_c = 3 \times 380^{+10\%}_{-15\%}$ В регулятор тормозного ключа (релейный или пропорциональный) настраивается из условия $U_{d макс} = 650 \text{ В}$.

Максимальное значение фазного напряжения и коэффициент усиления инвертора определяются напряжением звена постоянного тока U_d , которое в свою очередь зависит от напряжения сети U_c и тока двигателя $I_{1ф}$:

$$U_{иф.макс}(U_d) = \frac{U_d(U_c, I_{1ф})}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2}} = \frac{k_{ис} \cdot k_{исх}(I_{1ф}) \cdot U_{сн}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2}};$$

$$k_{и}(U_d) = \frac{U_d(U_c, I_{1ф})}{\sqrt{3}} = \frac{k_{ис} \cdot k_{исх}(I_{1ф}) \cdot U_{сн}}{\sqrt{3}}.$$

Зависимость значения коэффициента усиления инвертора от напряжения звена постоянного тока приводит к неоднозначности настройки параметров САР электропривода. Для компенсации зависимости осуществляется коррекция либо коэффициентов усиления регуляторов тока либо сигналов управления инвертором [см. раздел 4] посредством коэффициента коррекции

$$k_y(U_d) = \frac{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{иф.доп}}{U_d}.$$

Коррекция обеспечивает постоянство коэффициента передачи преобразователя частоты вне зависимости от напряжения звена постоянного тока

$$k_{пр}(U_d) = k_y(U_d) \cdot k_{и}(U_d) = \text{const}.$$

При выборе модуля вектора управления инвертором

$$\text{mod } \vec{U}_{1dq\text{макс}} = \text{mod } \vec{U}_{1\alpha\beta\text{макс}} = \text{mod } \vec{U}_{1abc\text{макс}} = 1$$

коэффициент передачи преобразователя частоты имеет постоянное значение

$$k_{пр} = \sqrt{2} \cdot U_{иф.доп}.$$

Допустимое значение выходного напряжения инвертора должно быть ограничено значением $U_{иф.доп} \approx (1.05 \div 1.1) \cdot U_{1фн}$. Поэтому при напряжении звена постоянного тока $U_d \geq \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{иф.доп}$ максимальное значение напряжения инвертора ограничено допустимым значением $U_{иф.макс} = U_{иф.доп}$, а при напряжении $U_d < \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{иф.доп}$ зависит от фактического значения U_d $U_{иф.макс} = U_{иф.макс}(U_d)$ и оказывается меньше допустимого значения. В этом случае максимальная достижимая угловая скорость вращения двигателя ограничивается значением

$$\omega_{эп.макс}^*(U_d) = \omega_{дв.н} \cdot \frac{U_{иф.макс}(U_d)}{U_{иф.доп}}.$$

При работе с номинальным потоком и номинальным моментом нагрузки можно записать

$$\omega_{эп.макс}^*(U_c) = \omega_{дв.н} \cdot \frac{1.35 \cdot (U_{смин} \div U_{смакс})}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{иф.доп}}.$$

Значение максимальной скорости $\omega_{эп.макс}^*$ соответствует работе электропривода на предельной характеристике разомкнутой по скорости системы.

Поэтому работа электропривода с замкнутой обратной связью по скорости возможна только при выполнении условия $\omega_{\text{эл.макс}} < \omega_{\text{эл.макс}}^*$.

Для полного использования двигателя по скорости ($\omega_{\text{эл.макс}} = \omega_{\text{дв.н}}$) и моменту ($M_{\text{с}} = M_{\text{дв.н}}$) номинальное напряжение сети должно соответствовать условию

$$U_{\text{сн}} \geq \frac{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{\text{иф.доп}}}{k_{\text{ис мин}} \cdot k_{\text{исх}} (I_{1\text{фн}})}, \text{ В.}$$

При заданной максимальной скорости электропривода $\omega_{\text{эл.макс}} < \omega_{\text{дв.н}}$ номинальное напряжение сети достаточно выбрать из условия

$$U_{\text{сн}} \geq \frac{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{\text{иф.доп}}}{k_{\text{ис мин}} \cdot k_{\text{исх}} (I_{1\text{фн}})} \cdot \frac{\omega_{\text{эл.макс}}}{\omega_{\text{дв.н}}}.$$

При изменениях напряжения питающей сети, так же будет изменяться значение максимальной достижимой скорости $\omega_{\text{эл.макс}}^*(U_{\text{с}})$. Возможны следующие пути реализации системы управления электропривода:

– принять постоянное значение максимальной рабочей скорости электропривода из условия

$$\omega_{\text{эл.раб.макс}} < \omega_{\text{эл.макс}}^*(U_{\text{с мин}});$$

– постоянно ослабить поток возбуждения двигателя до значения

$$\Psi_{2\text{зад}} = \Psi_{2\text{н}} \cdot \frac{\omega_{\text{эл.раб.макс}}}{\omega_{\text{дв.н}}}, \text{ что при длительном режиме работы требует снижение}$$

момента нагрузки во всем диапазоне регулирования скорости до значения

$$M_{\text{с длит.доп}} = M_{\text{дв.н}} \cdot \frac{\omega_{\text{эл.раб. макс}}}{\omega_{\text{дв.н}}};$$

– принять систему двухзонного управления электропривода, что так же требует снижение момента длительной нагрузки двигателя, но только при скорости $\omega_{\text{эл}} > \omega_{\text{эл.макс}}^*$

$$M_{\text{с длит.доп}} = M_{\text{дв.н}} \cdot \frac{\omega_{\text{эл.макс}}^*}{\omega_{\text{эл}}}.$$

Результаты исследования работы двухзонного асинхронного электропривода представлены в разделе 12.

Выводы к разделу 7

1. При питании преобразователя частоты от сети $U_c = 3 \times 380_{-15\%}^{+10\%}$ В полное использование асинхронного электродвигателя ($U_{1н} = 380$ В) по скорости при частотном векторном управлении достигается только при реализации двухзонного регулирования, что требует снижения нагрузки двигателя в зоне работы с ослабленным полем.

2. Для полного использования асинхронного электродвигателя по скорости и моменту при его питании от преобразователя частоты и частотном векторном управлении преобразователь следует питать от трехфазной сети с линейным напряжением не менее 420 В.

3. Для обеспечения максимальной производительности производственного механизма двигатель асинхронного электропривода с частотным векторным управлением и питанием от трехфазной сети $U_c = 3 \times 380_{-15\%}^{+10\%}$ В следует выбирать большего габарита по мощности и скорости.

Раздел 8. Имитационные модели асинхронного регулируемого электропривода с частотным векторным управлением

По результатам исследований, полученных в разделах 3 – 6, наиболее перспективным вариантом реализации системы векторного управления асинхронного электропривода общего назначения является четырехконтурная структура с ПИ-регуляторами, датчиками тока и скорости двигателя и простым наблюдателем потока на основе модели ротора и адаптивным наблюдателем скорости в качестве наблюдателя потокосцепления ротора в бездатчиковом электроприводе.

При разработке имитационной модели асинхронного регулируемого электропривода с частотным векторным управлением были использованы рекомендации и базовые модели асинхронного электропривода, приведенные в [21] и частично доработанные в разделах 1 – 6. Моделирование осуществлено в среде *MATLAB + Simulink* версия *MATLAB 7.11 (R2010b)*.

Основное требование к имитационной модели заключается в следующем: модель должна обеспечивать достоверность расчетов процессов в аналоговых элементах силовой части электропривода с учетом дискретности управления ключами инвертора и в элементах цифровой системы автоматического управления электропривода, работающих с временными интервалами квантования, равными или кратными периоду ШИМ инвертора.

В первом случае временной шаг расчета Δt процессов в аналоговых элементах должен удовлетворять условиям:

$$\frac{T_{1\Omega}}{\Delta t} \geq 10; \quad \frac{T_{\text{ШИМ}}}{\Delta t} \geq 100.$$

Во втором случае при моделировании процессов в цифровых элементах системы управления необходимо обеспечить выполнение следующих условий:

- все непрерывные сигналы должны быть квантованы по времени с выбранным интервалом T_k (рисунки 8.1 и 8.2), равным или кратным $T_{\text{ШИМ}}$: $T_k = n \cdot T_{\text{ШИМ}}$, где n – целое число ≥ 1 ;
- сигналы датчиков координат электропривода и задатчика управляющих воздействий должны быть квантованы по времени и уровню (рисунок 8.3);
- расчет процессов в цифровых элементах должен осуществляться с временным шагом, равным значению выбранного интервала квантования T_k по времени (рисунки 8.4 – 8.7).

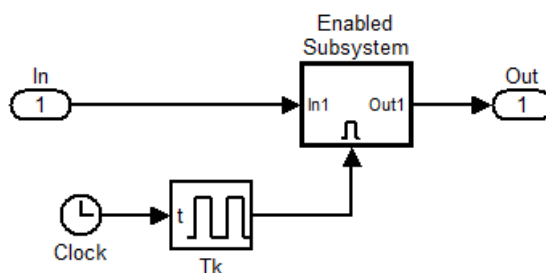


Рисунок 8.1 – Схема квантования непрерывного сигнала по времени

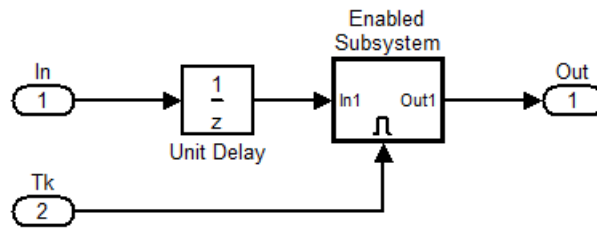


Рисунок 8.2 – Схема задержки квантованного сигнала на один интервал квантования T_K

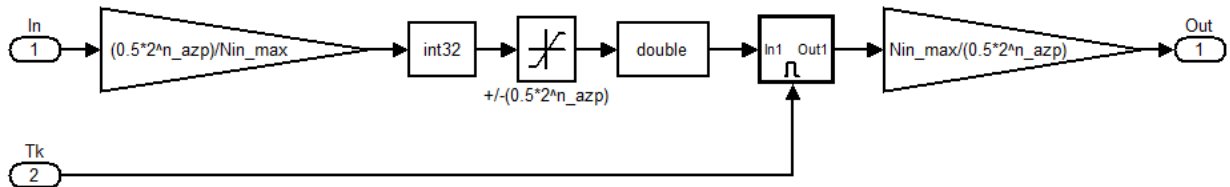


Рисунок 8.3 – Схема квантования непрерывного сигнала по уровню и времени

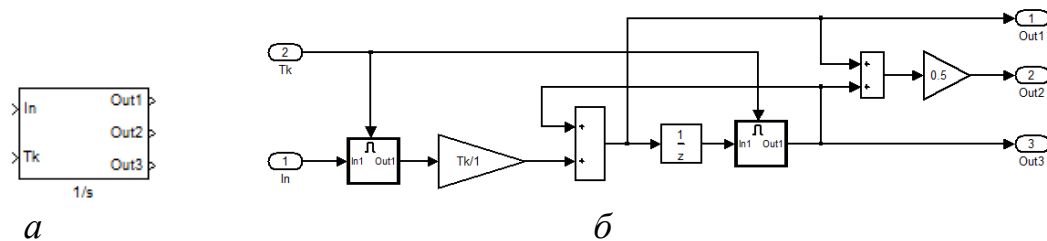


Рисунок 8.4 – Модель цифрового интегрирующего звена $\frac{1}{s}$ с квантованием входного сигнала: *a* – условное обозначение блока; *б* – схема набора

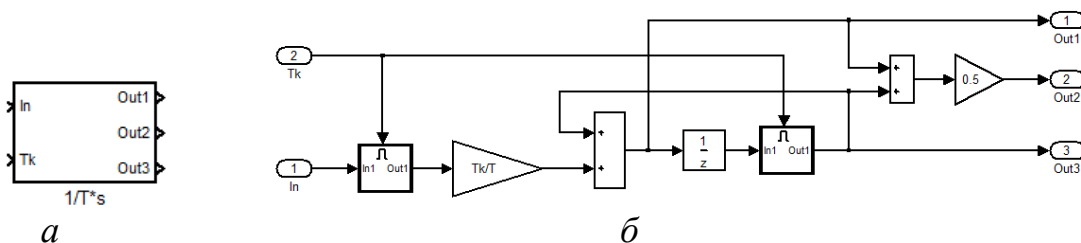


Рисунок 8.5 – Модель цифрового интегратора $\frac{1}{T \cdot s}$ с квантованием входного сигнала: *a* – условное обозначение блока; *б* – схема набора

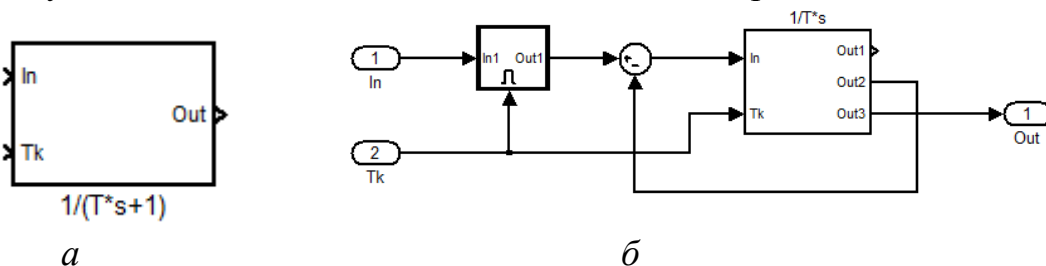
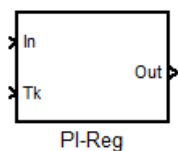
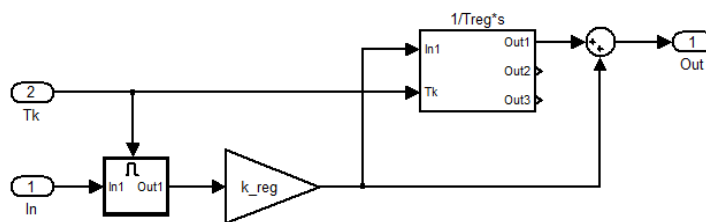


Рисунок 8.6 – Модель цифрового аperiodического звена $\frac{1}{T \cdot s + 1}$ с квантованием входного сигнала: *a* – условное обозначение блока; *б* – схема набора



a



б

Рисунок 8.7 – Модель цифрового ПИ-регулятора $k_{\text{рег}} \cdot \frac{T_{\text{рег}} \cdot s + 1}{T_{\text{рег}} \cdot s}$ с

квантованием входного сигнала: *a* – условное обозначение блока; *б* – схема набора

Модель цифрового интегрирующего звена $\frac{1}{s}$ (рисунок 8.4) формирует

квантованные с временным шагом T_k выходные сигналы с интерполяцией по конечному (выход 1), среднему (выход 2) и начальному (выход 3) значению выходного сигнала аналогового интегрирующего звена.

Раздел 9

Раздел 9. Имитационная модель однозонного асинхронного электропривода с частотным векторным управлением и двигателем RA200L4 мощностью 30 кВт

Для реализации модели электропривода принята структура с простым наблюдателем потока двигателя. Расчет выполнен по методике, изложенной в [20, 21] с учетом результатов исследований и выводов, полученных в разделах 3 – 6 настоящей работы. Модель приведена на компакт диске – REP_AD_Baza_1_30_1500.

Цель исследований:

1. Проверить разработанную модель электропривода и методику расчета параметров настройки САУ электропривода [20, 21] с учетом рекомендаций по её применению для цифровых систем, сделанных в разделах 3 – 6.
2. Оценить работоспособность выбранной структуры электропривода с простым наблюдателем потока двигателя при работе с нагрузкой реактивного и активного характера.
3. Оценить применение преобразователей угловых перемещений с выходными сигналами прямоугольной формы в качестве импульсных датчиков скорости вращения.

9.1. Расчет параметров настройки элементов модели электропривода

1. Справочные параметры электродвигателя RA200L4 [Интернет]:

$P_{\text{дв.н}} = 30 \text{ кВт}$, $U_{1\text{фн}} = 220 \text{ В}$, $n_{\text{дв.н}} = 1464 \text{ об/мин}$, $\eta_{\text{н}} = 92.3\%$, $\eta_{0.75} = 92.9\%$, $\cos\varphi_{\text{н}} = 0.89$, $\cos\varphi_{0.75} = 0.87$, $I_{\text{п}} / I_{\text{н}} = 7.6$, $M_{\text{п}} / M_{\text{н}} = 2.2$, $M_{\text{макс}} / M_{\text{н}} = 3.2$, $J_{\text{дв}} = 0.194 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $z_p = 2$.

Двигатель не имеет встроенных датчиков потока.

2. Параметры двигателя и схемы замещения:

$\beta = 1.46$, $\cos\varphi_{0.75} = 0.86$, $\eta_{0.75} = 92.8\%$,

$\omega_{\text{дв.н}} = 153.31 \text{ рад/с}$, $I_{1\text{фн}} = 55.333 \text{ А}$, $M_{\text{дв.н}} = 195.682 \text{ Н} \cdot \text{м}$,

$R_1 = 0.149 \text{ Ом}$, $L_{1\sigma} = 0.0007418 \text{ Гн}$, $R'_2 = 0.1 \text{ Ом}$, $L'_{2\sigma} = 0.001004 \text{ Гн}$,

$X_{\text{кн}} = 0.555 \text{ Ом}$, $X_{1\sigma} = 0.233 \text{ Ом}$, $X'_{2\sigma} = 0.316 \text{ Ом}$, $X_{\mu} = 12.318 \text{ Ом}$,

$L_m = 0.03921 \text{ Гн}$, $\Psi_{2\text{н}} = 0.931 \text{ Вб}$, $s_{\text{кр.расч.}} = 0.178$, $I_0 = 16.798 \text{ А}$,

$M_{\text{эм.н}} = 203.151 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $\Delta M_{\text{с.дв}} = 7.468 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $I_{d\text{н}} = 23.744 \text{ А}$.

3. Расчетные параметры структурных схем двигателя:

$L_1 = L_{1\sigma} + L_m = 0.0007418 + 0.03921 = 0.0399518 \text{ Гн}$;

$L'_2 = L'_{2\sigma} + L_m = 0.001004 + 0.03921 = 0.040214 \text{ Гн}$;

$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L'_2} = 1 - \frac{0.03921^2}{0.0399518 \cdot 0.040214} = 0.04307024$;

$R_{\text{пров}} = (1.1 \div 1.2) \cdot R_1 = (1.1 \div 1.2) \cdot 0.149 = 0.02 \text{ Ом}$;

$R_1^* = R_1 + R_{\text{пров}} = 0.149 + 0.02 = 0.169 \text{ Ом}$ – с учетом сопротивления соединительных проводов;

$$R_{1\text{э}}^* = R_1^* + R_2' \cdot \frac{L_m^2}{L_2'^2} = 0.169 + 0.1 \cdot \frac{0.03921^2}{0.040214^2} = 0.26407 \text{ Ом};$$

$$T_{1\text{э}}^* = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_{1\text{э}}^*} = \frac{0.04307024 \cdot 0.0399518}{0.26407} = 0.0065162 \text{ с};$$

$$T_2 = \frac{L_2'}{R_2'} = \frac{0.040214}{0.1} = 0.40214 \text{ с}.$$

4. Напряжение питающей сети: $U_c = 380_{-15\%}^{+10\%} \text{ В}$,

$$U_{\text{сн}} = 380 \text{ В}, U_{\text{смин}} = 323 \text{ В}, U_{\text{смакс}} = 418 \text{ В}.$$

5. Выбор предельных параметров электропривода.

Вариант 1. Принимаем значение максимального момента

$$M_{\text{эп.макс}} = 2 \cdot M_{\text{дв.н}} = 2 \cdot 195.68 = 391.36 \text{ Н} \cdot \text{м}, \text{ тогда}$$

$$M_{\text{эм.макс}} = M_{\text{эп.макс}} + \Delta M_{\text{с дв}} = 391.36 + 7.468 = 398.828 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$I_{1q \text{ макс}} = \frac{M_{\text{эм.макс}}}{\frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2'} \cdot z_p \cdot \Psi_{2\text{н}}} = \frac{398.828}{\frac{3}{2} \cdot \frac{0.03921}{0.040214} \cdot 2 \cdot 0.931} = 146.452 \text{ А},$$

$$\text{mod } \bar{I}_{1 \text{ макс}}^{\text{р}} = \sqrt{I_{1q \text{ макс}}^2 + I_{1d \text{ н}}^2} = \sqrt{146.452^2 + 23.744^2} = 148.364 \text{ А},$$

$$I_{\text{эп.макс}} = I_{1\text{ф макс}} = \frac{\text{mod } \bar{I}_{1 \text{ макс}}^{\text{р}}}{\sqrt{2}} = \frac{148.364}{\sqrt{2}} = 104.91 \text{ А}.$$

Кратность максимального тока двигателя

$$k_I = \frac{I_{\text{эп.макс}}}{I_{1\text{ф н}}} = \frac{104.91}{55.333} = 1.896,$$

что требует выбора преобразователя частоты с номинальной мощностью значительно больше номинальной мощности двигателя.

Вариант 2. Принимаем значение максимального тока

$$I_{\text{эп.макс}} = 1.5 \cdot I_{1\text{ф н}} = 1.5 \cdot 55.333 = 83 \text{ А}, \text{ тогда}$$

$$\text{mod } \bar{I}_{1 \text{ макс}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{эп.макс}} = \sqrt{2} \cdot 83 = 117.38 \text{ А};$$

$$I_{1q \text{ макс}} = \sqrt{(\text{mod } \bar{I}_{1 \text{ макс}}^{\text{р}})^2 - I_{1d \text{ н}}^2} = \sqrt{117.38^2 - 23.744^2} = 115 \text{ А};$$

$$M_{\text{эм.макс}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2'} \cdot z_p \cdot \Psi_{2\text{н}} \cdot I_{1q \text{ макс}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{0.03921}{0.040214} \cdot 2 \cdot 0.931 \cdot 115 = 313.2 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{эп.макс}} = M_{\text{эм.макс}} - \Delta M_{\text{с дв}} = 313.2 - 7.468 = 305.73 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Кратность максимального момента двигателя

$$k_M = \frac{M_{\text{эп.макс}}}{M_{\text{дв.н}}} = \frac{305.73}{195.682} = 1.562 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

что позволяет выбрать преобразователь частоты с номинальной мощностью равной номинальной мощности двигателя.

Далее в расчетах принято значение максимального тока электропривода $I_{\text{эл.макс}} = 83 \text{ А}$.

Значения максимальной достижимой скорости двигателем при номинальной нагрузке в зависимости от напряжения промышленной сети

$$\omega_{\text{эл.макс}}^*(U_c) = \omega_{\text{дв.н}} \cdot \frac{1.35 \cdot (U_{\text{с мин}} \div U_{\text{с макс}})}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{\text{иф доп}}} = 153.31 \cdot \frac{1.35 \cdot (323 \div 418)}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot 231} =$$

$$= (118.146 \div 152.685) \text{ рад/с},$$

где предварительно принято $U_{\text{иф.доп}} = 1.05 \cdot U_{1\text{фн}} = 231 \text{ В}$.

Значения $n_{\text{эл.макс}}^*$ соответствуют работе электропривода на предельной характеристике разомкнутой системы. Работа электропривода с замкнутой обратной связью по скорости возможна только при $n_{\text{эл.макс}} < n_{\text{эл.макс}}^*$.

Систему управления электропривода настраиваем на максимальное значение скорости $\omega_{\text{эл.макс}} = 150 \text{ рад/с}$ из условия $\omega_{\text{эл.макс}} \leq \omega_{\text{дв.н}}$, а рабочую скорость примем $\omega_{\text{раб.макс}} = 100 \text{ рад/с}$ из условия $\omega_{\text{раб.макс}} < \omega_{\text{эл.макс}}^*(U_{\text{с мин}})$

6. Параметры преобразователя частоты:

$$f_{\text{шим}} = 5000 \text{ Гц}, T_{\text{шим}} = 1 / f_{\text{шим}} = 0.0002 \text{ с};$$

Принимаем $\text{mod } \hat{u}_{1dq\text{макс}} = \text{mod } \hat{u}_{1\alpha\beta\text{макс}} = \text{mod } \hat{u}_{1abc\text{макс}} = 1$, тогда

$$k_{\text{пр}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{иф.доп}} = \sqrt{2} \cdot 231 = 326.7$$

Параметры сетевого реактора $R_p = 0.05 \text{ Ом}$, $L_p = 0.6 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$ в соответствии с таблицей 7.1 при расчетном значении номинального тока обмотки фазы

$$I_{\text{рфн}} = I_{1\text{фн}} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot U_{1\text{фн}}}{U_c} = 55.333 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot 220}{380} = 55.333 \text{ А}.$$

Принимаем $C = 200 \cdot 30 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$.

Принимаем: $U_{\text{он}} = 650 \text{ В}$, $U_{\text{офф}} = 620 \text{ В}$ для релейного и $U_{d\text{макс}} = 650 \text{ В}$ для пропорционального регулятора тормозного ключа.

7. Параметры механической системы электропривода:

Нагрузка переменная по характеру: $M_{\text{с макс}} = M_{\text{дв.н}} = 195.68 \text{ Н} \cdot \text{м}$,

$$\Delta M_{\text{с мех}} = 15.2 \text{ Н} \cdot \text{м}, J_{\text{мех}} = J_{\text{дв}} = 0.194 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

8. Временной шаг расчета модели: $\Delta t = 0.000001 \text{ с}$.

9. Расчет параметров настройки контуров тока:

– контуры токов I_d и I_q одинаковые;

– принимаем: $T_{к.т} = T_{пк.т} = T_{ос.т}$, $T_{к.т} = 0.0002$ с, $T_{зу.и} = 0.0002$ с, $n_t = 2$,

$$N_{ос.т\max} = 1, n_{ацп\text{дт}} = 10, T_{ф.от} = 0;$$

– принимаем максимальное измеряемое значение тока $I_{изм.\max} = 150$ А из условия

$$I_{изм.\max} \geq (1.1 \div 1.2) \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1ф\max} = (1.1 \div 1.2) \cdot \sqrt{2} \cdot 83 = 129.12 \div 140.855 \text{ А};$$

– коэффициент передачи датчика тока

$$k_{дт} = \frac{0.5 \cdot 2^{n_{ацп\text{дт}}}}{I_{изм.\max}} = \frac{512}{150} \text{ 1/А};$$

– масштабирующий коэффициент преобразования выходного сигнала датчика тока

$$k_{i\text{дт}} = \frac{I_{изм.\max}}{0.5 \cdot 2^{n_{ацп\text{дт}}}} = \frac{150}{512} \text{ А};$$

– коэффициент согласования сигнала обратной связи на входе регулятора тока и коэффициент обратной связи по току

$$k_{ос.т} = k_t = \frac{N_{ос.т\max}}{I_{изм.\max}} = \frac{1}{150} \text{ 1/А};$$

– максимальное значение задания тока на входе контура

$$N_{зт.\max} = k_t \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1ф\max} = \frac{1}{150} \cdot \sqrt{2} \cdot 83 = 0.7825;$$

– эквивалентная малая постоянная времени контура тока

$$T_{мтэ} = n_t \cdot \frac{T_{к.т}}{2} + T_{зу.и} + T_{ф.от} = 2 \cdot \frac{0.0002}{2} + 0.0002 + 0 = 0.0004 \text{ с};$$

– постоянная времени регулятора тока

$$T_{рт} = T_{1э}^* = 0.0065162 \text{ с};$$

– коэффициент усиления регулятора тока

$$k_{рт} = \frac{T_{1э}^* \cdot R_{1э}^*}{k_{ип} \cdot k_t \cdot 2 \cdot T_{мтэ}} = \frac{0.0065162 \cdot 0.26407 \cdot 150}{326.7 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 0.0004} = 0.9876;$$

– значения выходных сигналов регуляторов тока ограничиваются формирователем управлений инвертором (см. рисунок 4.8) на уровне:

$$\text{mod } u_{1d\max}^* = 1 \cdot k_y(U_d) \quad \text{и} \quad \text{mod } u_{1q\max}^* = \sqrt{(1 \cdot k_y(U_d))^2 - (u_{1d}^*)^2};$$

– эквивалентная постоянная времени замкнутого контура тока

$$T_{тд} = T_{тq} = 2 \cdot T_{мтэ} = 2 \cdot 0.0004 = 0.0008 \text{ с}.$$

10. Расчет параметров настройки контура потокосцепления без датчика потока:

– принимаем: $T_{к.\psi} = T_{пк.\psi} = T_{ос.\psi}$, $T_{к.\psi} = 0.002$ с, $n_\psi = 2$, $T_{ф.о\psi} = 0$,

$$N_{ос.\psi\max} = 1;$$

– максимальное расчетное значение потока $\Psi_{2\text{расч.макс}} = 1 \text{ Вб}$ из условия $\Psi_{2\text{расч.макс}} \geq (1.05 \div 1.1) \cdot \Psi_{2\text{н}} = (1.05 \div 1.1) \cdot 0.931 = 0.97755 \div 1.0241 \text{ Вб}$;

– коэффициент согласования сигнала обратной связи на входе регулятора потока и коэффициент обратной связи по потоку

$$k_{\text{ос.}\Psi} = k_{\Psi} = \frac{N_{\text{ос.}\Psi \text{ макс}}}{\Psi_{2\text{расч.макс}}} = 1 \text{ 1/Вб};$$

– максимальное значение задания потока на входе контура

$$N_{3\Psi \text{ макс}} = k_{\Psi} \cdot \Psi_{2\text{н}} = 1 \cdot 0.931 = 0.931$$

– эквивалентная малая постоянная времени контура потока

$$T_{\mu\Psi} = T_{Td} + \frac{T_{\kappa.\Psi}}{n_{\Psi}} + T_{\text{ф.о}\Psi} = 0.0008 + \frac{0.002}{2} + 0 = 0.0018, \text{ с};$$

– постоянная времени регулятора потока

$$T_{p\Psi} = T_2 = 0.40214 \text{ с};$$

– коэффициент усиления регулятора потока

$$k_{p\Psi} = \frac{T_2 \cdot k_T}{L_m \cdot k_{\Psi} \cdot 2 \cdot T_{\mu\Psi}} = \frac{0.40214 \cdot 1}{150 \cdot 0.03921 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 0.0018} = 19;$$

– максимальное значение выходного сигнала регулятора потока

$$N_{p\Psi \text{ доп}} = N_{3\Psi \text{ макс}} = 0.7825.$$

11. Контур скорости.

Параметры аналогового датчика скорости:

– коэффициент передачи датчика

$$k_{\text{анал.дс}} = \frac{0.5 \cdot 2^{n_{\text{анп дс}}}}{\omega_{\text{изм. макс}}}, \text{ с/рад};$$

– масштабирующий коэффициент преобразования выходного сигнала датчика скорости

$$k_{\omega \text{ анал. дс}} = \frac{\omega_{\text{изм. макс}}}{0.5 \cdot 2^{n_{\text{анп дс}}}}, \text{ рад/с}.$$

Параметры импульсного датчика скорости:

– коэффициент передачи датчика

$$k_{\text{имп. дс}} = \frac{n_{\text{имп. дс}} \cdot T_{\kappa.\text{дс}}}{2\pi}, \text{ с/рад};$$

– масштабирующий коэффициент преобразования выходного сигнала датчика

$$k_{\omega \text{ имп.дс}} = \frac{2\pi}{n_{\text{имп.дс}} \cdot T_{\kappa.\text{дс}}}, \text{ рад/с}.$$

Расчет параметров настройки контура скорости с датчиком скорости:

– принимаем:

$$T_{\kappa.\text{с}} = T_{\text{пк.с}} = T_{\text{ос.с}}, T_{\kappa.\text{с}} = 0.002 \text{ с}, T_{\text{ф.ос}} = 0, n_{\text{с}} = 2, N_{\text{ос.смакс}} = 1;$$

– максимальное измеряемое значение скорости $\omega_{\text{изм.макс}} = 180 \text{ рад/с}$ из условия

$$\omega_{\text{изм.макс}} \geq 1.2 \cdot \omega_{\text{эп.макс}} = 1.2 \cdot 150 = 180 \text{ рад/с};$$

– коэффициент согласования сигнала обратной связи на входе регулятора скорости и коэффициент обратной связи по скорости

$$k_{\text{ос.с}} = k_{\text{с}} = \frac{N_{\text{ос.с макс}}}{\omega_{\text{изм.макс}}} = \frac{1}{180} \text{ с/рад};$$

– максимальное значение задания скорости на входе контура

$$N_{\text{зс.макс}} = k_{\text{с}} \cdot \omega_{\text{эп.макс}} = \frac{1}{180} \cdot 150 = 0.8333;$$

– эквивалентная малая постоянная времени контура скорости с аналоговым датчиком

$$T_{\text{мсэ}} = T_{\text{тq}} + \frac{T_{\text{к.с}}}{n_{\text{с}}} + T_{\text{ф.ос}} = 0.0008 + \frac{0.002}{2} + 0 = 0.0018 \text{ с};$$

– постоянная времени регулятора скорости с аналоговым датчиком

$$T_{\text{рс}} = 4 \cdot T_{\text{мсэ}} = 4 \cdot 0.0018 = 0.0072 \text{ с};$$

– коэффициент усиления регулятора скорости с аналоговым датчиком

$$k_{\text{рс}} = \frac{J_{\text{э}} \cdot k_{\text{т}}}{\Psi_{2\text{н}} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L'_2} \cdot z_{\text{р}} \cdot k_{\text{с}} \cdot 2 \cdot T_{\text{мсэ}}} = \frac{0.388 \cdot 1 \cdot 180}{150 \cdot 0.931 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{0.03921}{0.040214} \cdot 2 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 0.0018} = 47.49;$$

– постоянная времени фильтра на входе контура скорости с аналоговым датчиком

$$T_{\text{ф.вх}} = T_{\text{рс}} = 0.0072 \text{ с};$$

– эквивалентная малая постоянная времени контура скорости с импульсным датчиком

$$T_{\text{мсэ}} = T_{\text{тq}} + \frac{1.5 \cdot T_{\text{к.с}}}{n_{\text{с}}} + T_{\text{ф.ос}} = 0.0008 + \frac{1.5 \cdot 0.002}{2} + 0 = 0.0023 \text{ с};$$

– постоянная времени регулятора скорости с импульсным датчиком

$$T_{\text{рс}} = 4 \cdot T_{\text{мсэ}} = 4 \cdot 0.0023 = 0.0092 \text{ с};$$

– коэффициент усиления регулятора скорости с импульсным датчиком

$$k_{\text{рс}} = \frac{0.388 \cdot 1 \cdot 180}{150 \cdot 0.931 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{0.03921}{0.040214} \cdot 2 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 0.0023} = 37.17;$$

– постоянная времени фильтра на входе контура скорости с импульсным датчиком

$$T_{\text{ф.вх}} = T_{\text{рс}} = 0.0092 \text{ с};$$

– допустимое значение выходного сигнала регулятора скорости

$$N_{\text{рс. доп}} = \sqrt{N_{\text{зт. макс}}^2 - N_{\text{р}\Psi}^2} = \sqrt{0.7825^2 - N_{\text{р}\Psi}^2}.$$

12. Расчет параметров настройки задатчика интенсивности скорости с S-образной выходной характеристикой (см. рисунок 1.2):

– время прямого пуска двигателя до максимальной скорости при максимальных значениях момента инерции привода и статического момента нагрузки, принимаем $\omega_{\text{макс}} = \omega_{\text{эл.макс}} = 150 \text{ рад/с}$

$$t_{\text{пр.пуск}} = (J_{\text{дв}} + J_{\text{мех}}) \cdot \frac{\omega_{\text{эл.макс}}}{M_{\text{эл.макс}} - M_{\text{с макс}}} =$$

$$= (0.194 + 0.194) \cdot \frac{150}{305.73 - 195.68} = 0.53 \text{ с};$$

– принимаем временной интервал квантования выходного сигнала задатчика скорости $T_{\text{к.зи}} = 0.002 \text{ с}$;

– из условия $t_1 + t_2 > t_{\text{пр.пуск}}$ принимаем $t_1 + t_2 + t_3 = 1.2 \text{ с}$, $t_1 = t_3 = 0.2 \text{ с}$, $t_2 = 1.0 \text{ с}$, тогда параметры настройки задатчика:

$$\frac{T_{\text{и1}}}{T_{\text{к.зи}}} = \frac{t_1}{T_{\text{к.зи}}} = \frac{0.2}{0.002} = 100, \quad \frac{T_{\text{и2}}}{T_{\text{к.зи}}} = \frac{(t_1 + t_2)}{T_{\text{к.зи}}} = \frac{1.0}{0.002} = 500,$$

$$k = 0.5 \cdot \frac{T_{\text{и1}}}{T_{\text{и2}}} = 0.5 \cdot \frac{0.2}{1.0} = 0.1.$$

9.2. Исследование электропривода на имитационной модели

Исследования проведены на модели REP_AD_Baza_dvz_30_1500. При настройке модели приняты одинаковые для аналогового и импульсного датчика скорости расчетные параметры: $k_{\text{рс}} = 47.49$, $T_{\text{рс}} = 0.0072 \text{ с}$, $T_{\text{ф.вх}} = 0.0072 \text{ с}$, интервал расчета наблюдателя потока $T_{\text{к.набл.}\Psi} = T_{\text{к.т}}$, а интервал оцифровки датчиков скорости изменялся в пределах $T_{\text{к.т}} \leq T_{\text{к.дс}} \leq T_{\text{к.с}}$

9.2.1. На рисунках 9.1 и 9.2 приведены диаграммы напряжения звена постоянного тока $U_d(t)$, фазного действующего тока $I_{1\text{ф}}(t)$, электромагнитного момента $M_{\text{эм}}(t)$ и скорости двигателя $\omega_{\text{дв}}(t)$, полученные при неизменных настройках системы управления электропривода с аналоговым датчиком потока двигателя ($n_{\text{ацп д}\Psi} = 12$, $T_{\text{к.д}\Psi} = 0.0002 \text{ с}$) для двух случаев соответственно: – с аналоговым датчиком скорости ($n_{\text{ацп дс}} = 14$, $T_{\text{к.дс}} = 0.002 \text{ с}$); – с импульсным датчиком скорости ($n_{\text{имп.дс}} = 4 \cdot 2500$, $T_{\text{к.дс}} = 0.002 \text{ с}$).

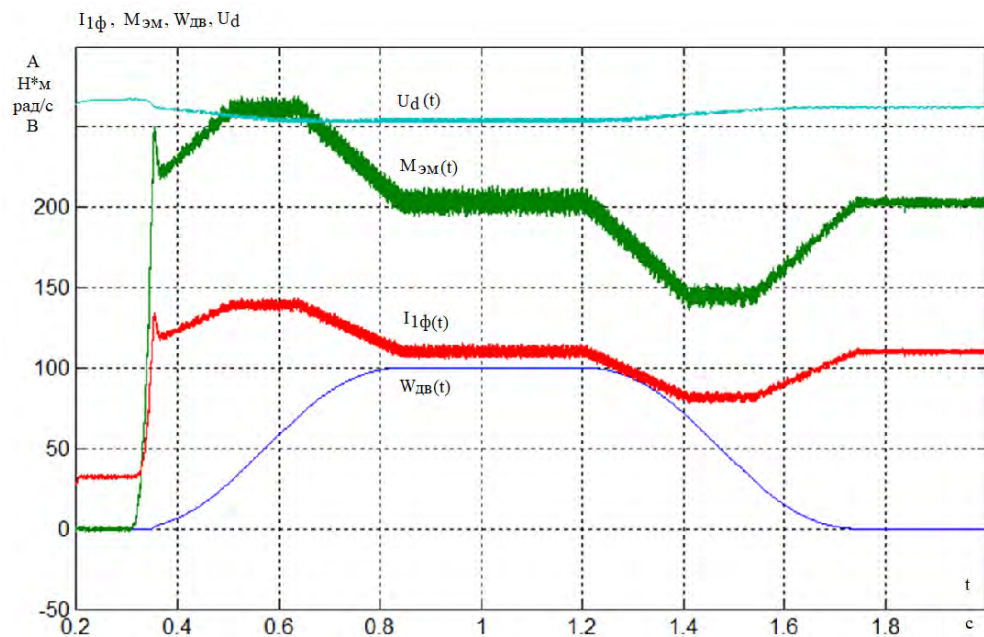


Рисунок 9.1 – Электропривод с аналоговым датчиком потока и аналоговым датчиком скорости

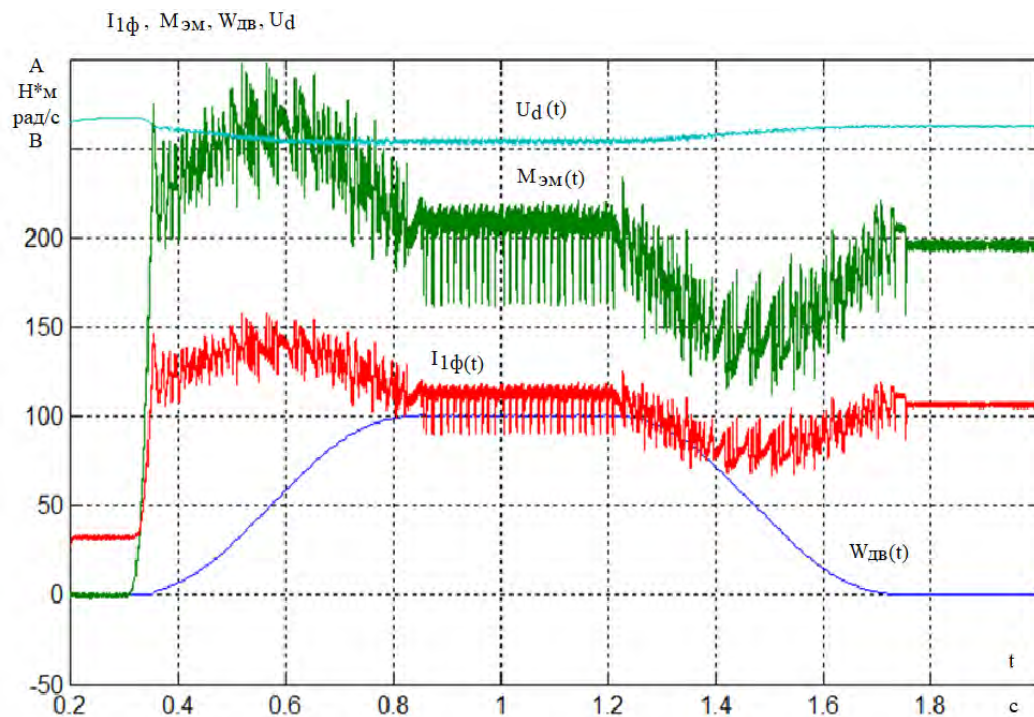


Рисунок 9.2 – Электропривод с аналоговым датчиком потока и импульсным датчиком скорости

Вывод к п. 9.2.1. Импульсный датчик скорости значительно проигрывает аналоговому датчику и эквивалентен ему только при большом числе импульсов на оборот вала (см. раздел 6). Удовлетворительные результаты с импульсным датчиком скорости достигаются только при $n_{\text{имп.дс}} \geq 4 \cdot 2500$.

9.2.2. На рисунках 9.3 и 9.4 приведены диаграммы напряжения $U_d(t)$, тока $I_{1\phi}(t)$, момента $M_{эм}(t)$ и скорости $\omega_{дв}(t)$ двигателя, полученные при неизменных настройках системы управления, но с простым наблюдателем потока ($T_{к.набл\psi} = 0.0002$ с) и, соответственно, с аналоговым ($n_{ацп\text{дс}} = 14$) и импульсным ($n_{имп\text{дс}} = 4 \cdot 2500$) датчиком скорости ($T_{к.дс} = 0.002$ с).

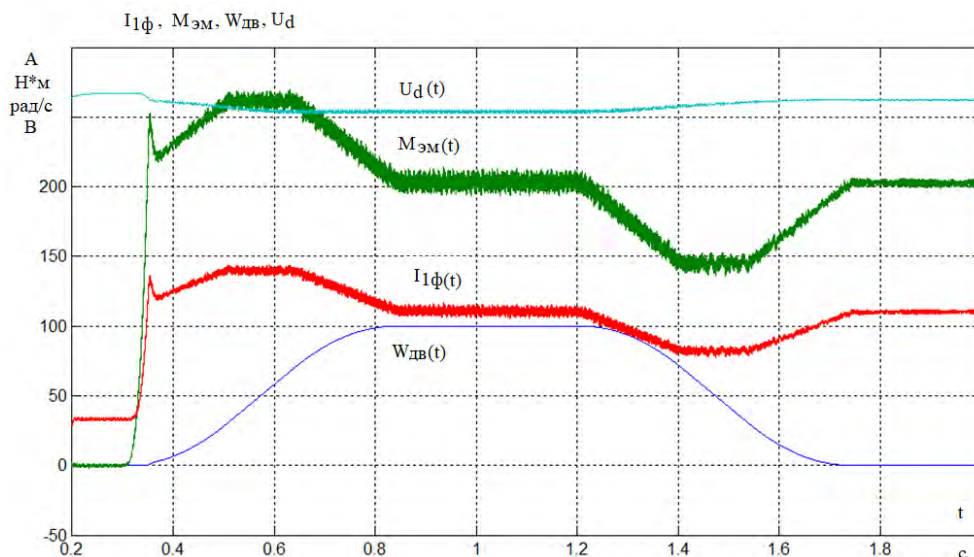


Рисунок 9.3 – Электропривод с простым наблюдателем потока и аналоговым датчиком скорости

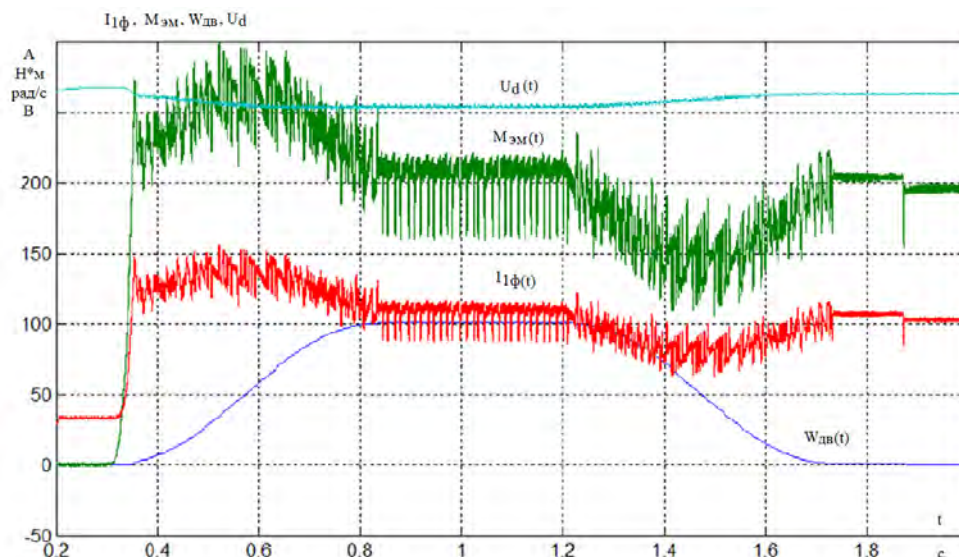


Рисунок 9.4 – Электропривод с простым наблюдателем потока и импульсным датчиком скорости

Вывод к п. 9.2.2. При точном знании параметров двигателя простой наблюдатель потока на основе модели двигателя (рисунок 5.9, а) обеспечивает адекватность процессов в электроприводе с датчиком потока.

9.2.3. На рисунках 9.5 и 9.6 приведены диаграммы напряжения $U_d(t)$, тока $I_{1\phi}(t)$, момента $M_{эм}(t)$ и скорости $\omega_{дв}(t)$ двигателя при отработке

электроприводом с простым наблюдателем потока ($T_{к.набл\psi} = 0.0002\text{ с}$) и импульсным датчиком скорости ($n_{имп,дс} = 4 \cdot 2500$, $T_{к.дс} = 0.002\text{ с}$) ступенчатого задания скорости с нагрузкой, соответственно, реактивного и активного характера.

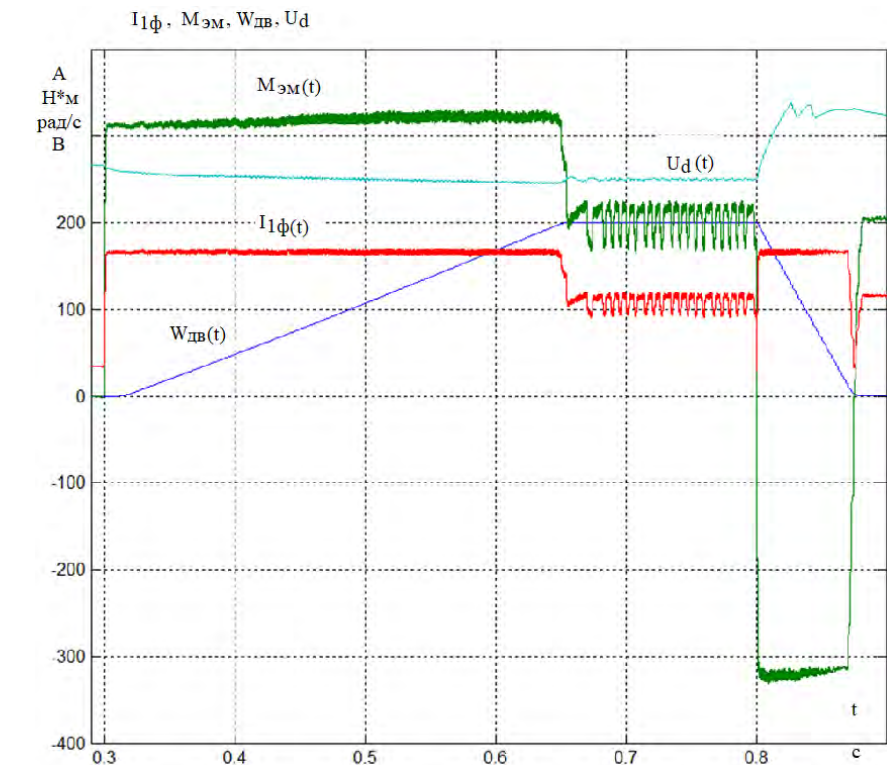


Рисунок 9.5 – Электропривод с простым наблюдателем потока, импульсным датчиком скорости и нагрузкой реактивного характера

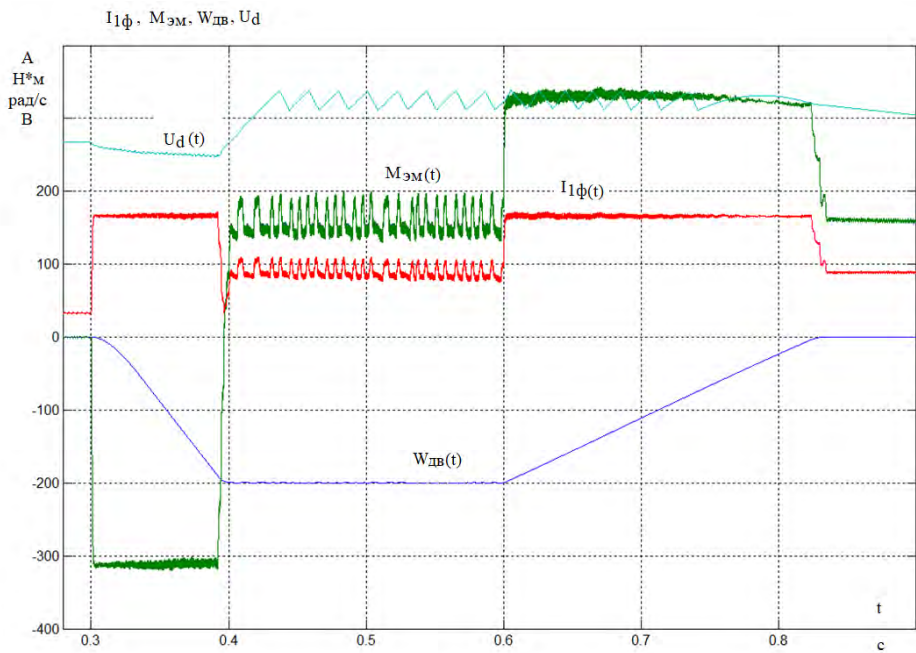


Рисунок 9.6 – Электропривод с простым наблюдателем потока, импульсным датчиком скорости и нагрузкой активного характера

9.2.4. На рисунках 9.7 и 9.8 приведены диаграммы напряжения $U_d(t)$, тока $I_{1\phi}(t)$, момента $M_{эм}(t)$ и скорости $\omega_{дв}(t)$ двигателя при управлении электроприводом с простым наблюдателем потока ($T_{к.набл\psi} = 0.0002$ с) и импульсным датчиком скорости ($n_{имп.дс} = 4 \cdot 2500$, $T_{к.дс} = 0.002$ с) от задатчика интенсивности скорости с нагрузкой, соответственно, реактивного и активного характера.

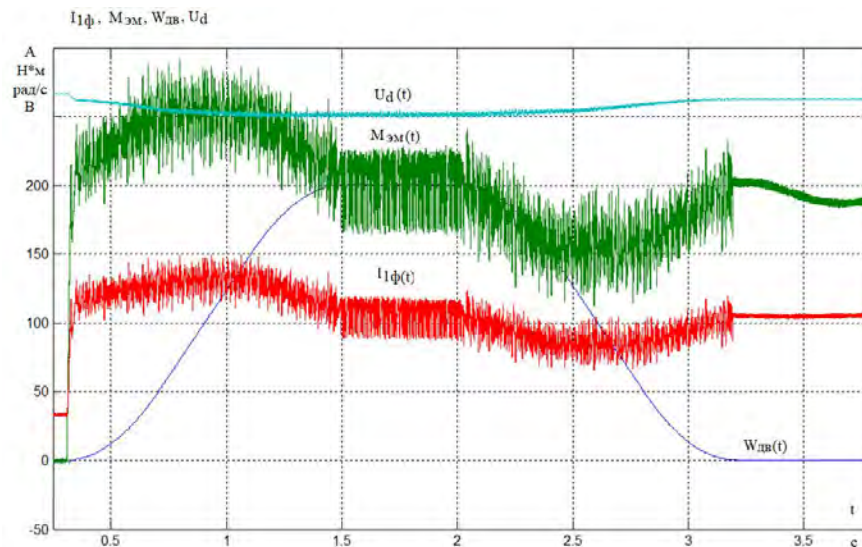


Рисунок 9.7 – Электропривод с простым наблюдателем потока, импульсным датчиком скорости и нагрузкой реактивного характера

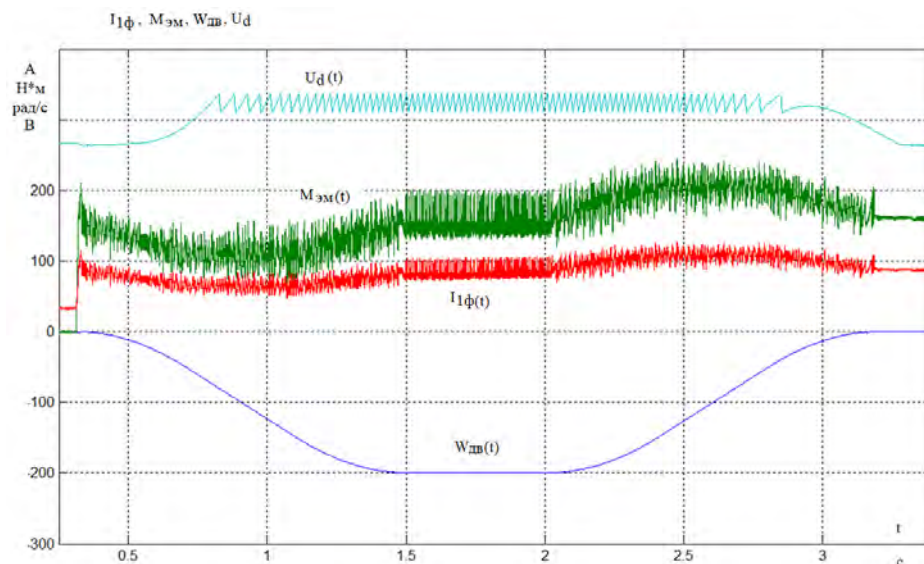
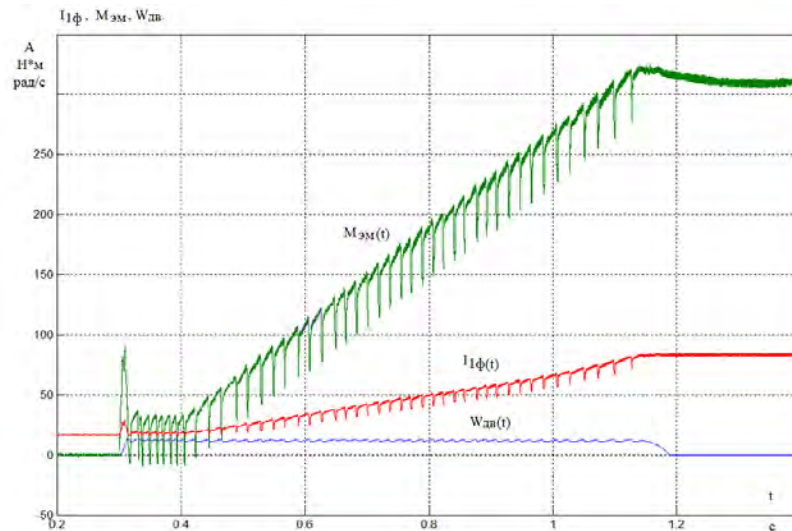


Рисунок 9.8 – Электропривод с простым наблюдателем потока, импульсным датчиком скорости и нагрузкой активного характера

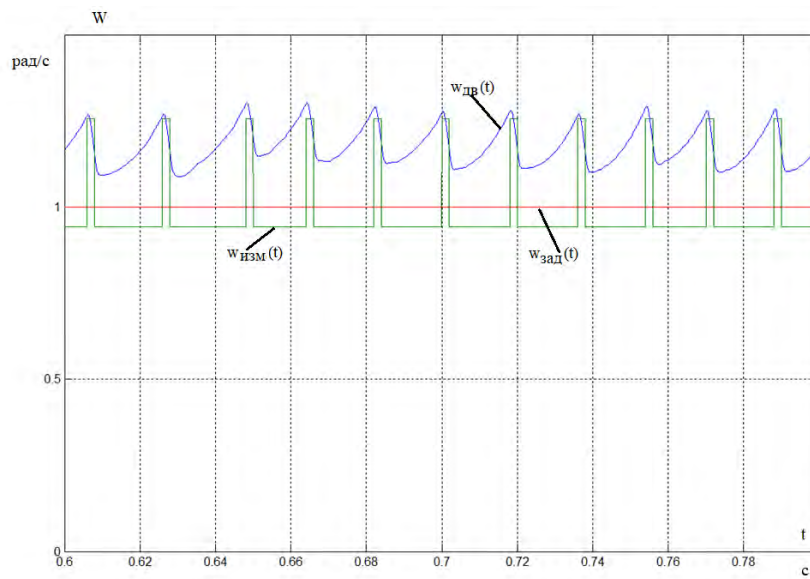
Вывод к п. 9.2.4. Электропривод с простым наблюдателем потока может работать с нагрузкой как реактивного, так и активного характера.

9.2.5. На рисунке 9.9, а приведены диаграммы тока $I_{1\phi}(t)$, момента $M_{эм}(t)$ и скорости $\omega_{дв}(t)$ двигателя, а на рисунке 9.9, б диаграммы заданной $\omega_{зад}(t)$,

фактической $\omega_{\text{дв}}(t)$ и измеренной импульсным датчиком $\omega_{\text{изм}}(t)$ скорости двигателя, соответствующие работе электропривода со скоростью $\omega_{\text{зад}} = 1$ рад/с и последующим плавным увеличением статического момента нагрузки до значения более $M_{\text{эп.макс}} = 305.73$ Н·м.



a



б

Рисунок 9.9 – Электропривод с простым наблюдателем потока, импульсным датчиком скорости и плавным увеличением статического момента

Вывод к п. 9.2.5. Из-за квантования по уровню сигнала обратной связи по скорости электропривод с цифровым управлением имеет статическую ошибку по управлению. Статическая ошибка по возмущению отсутствует.

9.2.6. На рисунке 9.10, *a* приведены диаграммы напряжения $U_d(t)$, тока $I_{1\phi}(t)$, момента $M_{\text{эм}}(t)$ и скорости $\omega_{\text{дв}}(t)$ двигателя, соответствующие работе электропривода при напряжении сети $U_{\text{с макс}} = 418$ В, с разомкнутым контуром

скорости, отключенным ограничением тока и последующим плавным увеличением статического момента нагрузки до стопорения двигателя. Механическая характеристика электропривода с разомкнутым контуром скорости, соответствующая напряжению сети $U_{с макс} = 418 \text{ В}$, приведена на рисунке 9.10, б. На рисунке 9.11 представлено семейство предельных механических характеристик электропривода с разомкнутым контуром скорости, соответствующих напряжениям сети $U_{с макс} = 418 \text{ В}$, $U_{с н} = 380 \text{ В}$ и $U_{с мин} = 323 \text{ В}$.

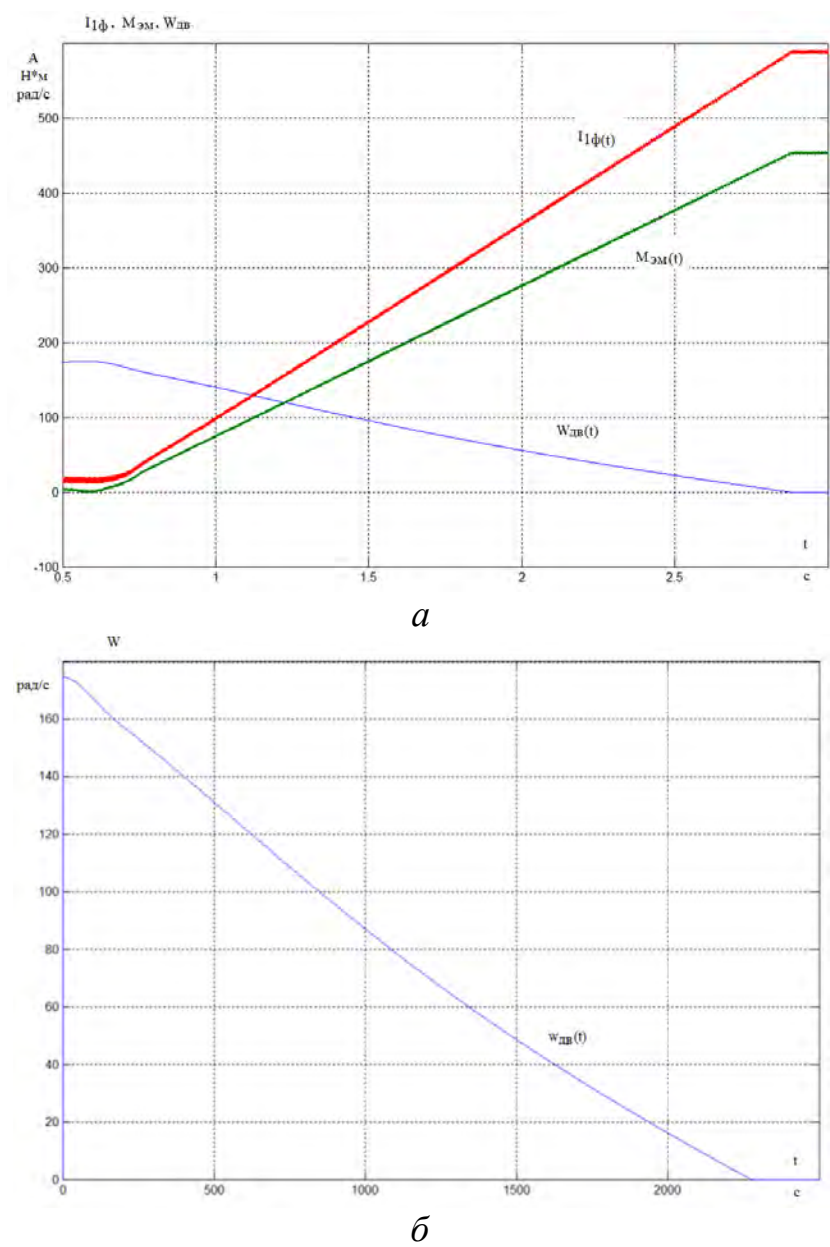


Рисунок 9.10 – Работа электропривода с разомкнутым контуром скорости, отключенным ограничением тока при напряжении сети $U_{с макс} = 418 \text{ В}$ и плавном увеличении статического момента нагрузки

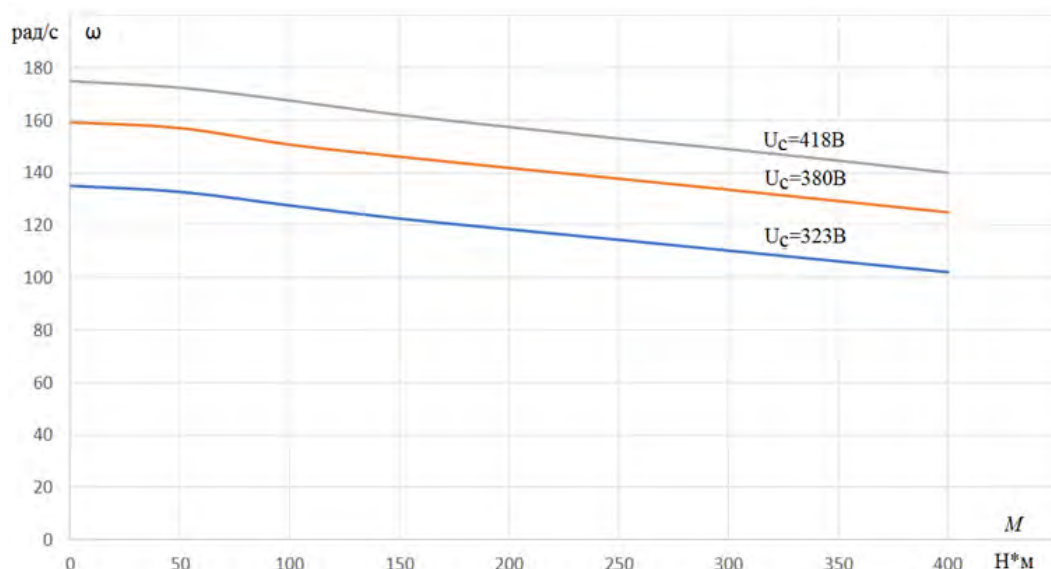


Рисунок 9.11. Семейство механических характеристик электропривода с разомкнутым контуром скорости

Вывод к п. 9.2.6. Область работы электропривода с замкнутым контуром скорости ограничена характеристиками электропривода с разомкнутым контуром скорости, зависящими от напряжения сети. Следовательно, максимальная рабочая скорость электропривода должна выбираться из условия

$$\omega_{\text{раб.макс}} < \omega_{\text{эп.макс}}^* (U_{\text{с мин}}).$$

Общие выводы к разделу 9

1. Разработанная модель однозонного асинхронного электропривода с частотным векторным управлением и простым наблюдателем потока двигателя работоспособна, предложенная методика при известных параметрах двигателя позволяет рассчитать параметры и настроить САУ электропривода.

2. Для систем асинхронного электропривода общего назначения при настройке контур скорости достаточно принять $T_{\text{к.с}} = 0.002 - 0.001 \text{ с}$.

3. При настройке контура скорости с аналоговым датчиком и выполнении условия

$$T_{\text{к.т}} \cdot \frac{2^{n_{\text{апп.дс}}}}{2} \cdot \frac{\&_{\text{доп. макс}}}{\omega_{\text{изм. макс}}} \geq 1,$$

где $\&_{\text{доп. макс}}$ – максимальное допустимое значение ускорения электропривода, рад/с, следует принять $T_{\text{к.с}} = T_{\text{к.дс}} = T_{\text{к.набл.}\Psi} = T_{\text{к.т}}$, что обеспечит его настройку на максимальное быстродействие. В противном случае значение $T_{\text{к.с}}$ находится из условия

$$T_{\text{к.с}} \cdot \frac{2^{n_{\text{апп.дс}}}}{2} \cdot \frac{\&_{\text{макс}}}{\omega_{\text{изм. макс}}} \geq 1 \quad \text{и далее} \quad T_{\text{к.дс}} = T_{\text{к.набл.}\Psi} = T_{\text{к.т}}.$$

4. При настройке контура скорости с импульсным датчиком и выполнении условия

$$\frac{T_{к.т}^2 \cdot \&_{доп. макс}}{2 \cdot \pi} \cdot 4 \cdot n_{имп.дс} \geq 1,$$

следует принять $T_{к.с} = T_{к.дс} = T_{к.набл.\Psi} = T_{к.т}$, что обеспечит настройку контура на максимальное быстродействие. В противном случае значение $T_{к.с}$ находится из условия

$$\frac{T_{к.с}^2 \cdot \&_{макс}}{2 \cdot \pi} \cdot 4 \cdot n_{имп.дс} \geq 1 \text{ и тогда } T_{к.дс} = T_{к.с}, \quad T_{к.набл.\Psi} = T_{к.т}.$$

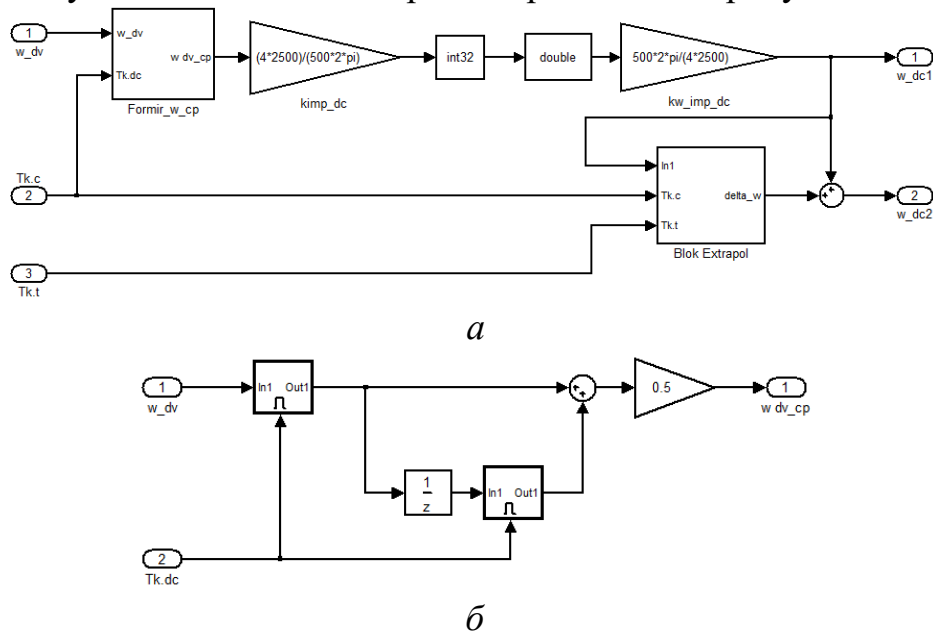
Для обратной связи в контуре скорости с импульсным датчиком используется оцифрованное датчиком значение средней скорости на интервале измерения

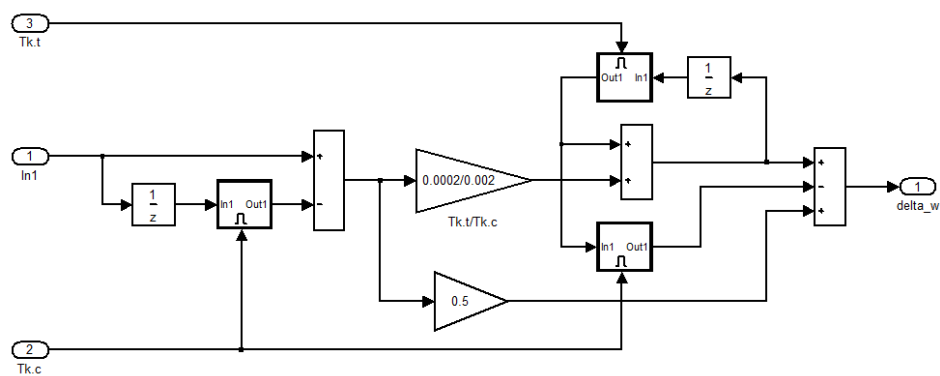
$$N_{\omega oc} = N_{\omega i} = \left(\frac{\omega_i + \omega_{i-1}}{2} \right) \cdot T_{к.дс} \cdot \frac{4 \cdot n_{имп.дс}}{2\pi},$$

а для расчета наблюдателя потока – ее экстраполированное значение

$$N_{\omega набл.\Psi} = N_{\omega i} + \frac{N_{\omega i} - N_{\omega i-1}}{2} + \sum_1^k \frac{T_{к.т}}{T_{к.дс}} \cdot \frac{N_{\omega i} - N_{\omega i-1}}{2}, \text{ где } k = \frac{T_{к.дс}}{T_{к.т}}.$$

Схема импульсного датчика скорости приведена на рисунке 9.12.





в

Рисунок 9.12. Импульсный датчик скорости: *а* – полная схема; *б* – схема формирователя значения средней скорости; *в* – схема экстраполятора коррекции скорости

Раздел 10. Имитационная модель однозонного асинхронного электропривода с частотным векторным управлением и двигателем АИР112МА6 мощностью 3 кВт

Для реализации модели электропривода принята структура с простым наблюдателем потока двигателя и импульсным датчиком скорости, реализованным в соответствии с рекомендациями, сделанными в разделе 9.

Цель исследований. Проверить разработанную модель электропривода и методику расчета параметров настройки САУ электропривода с импульсным датчиком скорости, изложенную в [20, 21], и рекомендаций по её применению для цифровых систем, сделанных в разделах 3 – 6 и 9. Модель приведена на компакт диске – REP_AD_Baza_1_3_1000.

10.1. Расчет параметров настройки элементов модели электропривода

10.1.1. Справочные параметры электродвигателя АИР112МА6 [20, раздел 8, таблица 8.5]:

$P_{\text{дв.н}} = 3 \text{ кВт}$, $U_{1\text{фн}} = 220 \text{ В}$, $n_0 = 1000 \text{ об/мин}$, $s_{\text{н}} = 5\%$, $n_{\text{дв.н}} = 950 \text{ об/мин}$, $\eta_{\text{н}} = 81\%$, $\eta_{0.75} = 76$, $\cos\varphi_{\text{н}} = 0.76$, $I_{\text{п}}/I_{\text{н}} = 6$, $M_{\text{п}}/M_{\text{н}} = 2$, $M_{\text{м}}/M_{\text{н}} = 1.6$, $M_{\text{макс}}/M_{\text{н}} = 2.2$, $J_{\text{дв}} = 0.017 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Двигатель не имеет встроенных датчиков потока.

10.1.2. Параметры двигателя и схемы замещения:

$\beta = 1.35$, $\eta_{0.75} = 0.81$, $\cos\varphi_{0.75} = 0.7$,

$R_1 = 2.535 \text{ Ом}$, $L_{1\sigma} = 0.009427 \text{ Гн}$,

$R'_2 = 1.802 \text{ Ом}$, $L'_{2\sigma} = 0.012 \text{ Гн}$,

$L_m = 0.16371 \text{ Гн}$, $z_p = 3$,

$\omega_{\text{дв.н}} = 99.484 \text{ рад/с}$, $n_{\text{дв.н}} = 950 \text{ об/мин}$,

$I_{1\text{фн}} = 7.384 \text{ А}$, $M_{\text{дв.н}} = 30.156 \text{ Н} \cdot \text{м}$,

$I_0 = 3.726 \text{ А}$, $M_{\text{эм.н}} = 32.427 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $\Delta M_{\text{с дв}} = 2.271 \text{ Н} \cdot \text{м}$,

$\Psi_{2\text{н}} = 0.863 \text{ Вб}$, $s_{\text{красч.}} = 0.251$,

$X_{\text{кн}} = 7.051 \text{ Ом}$, $X_{1\sigma} = 2.961 \text{ Ом}$,

$X'_{2\sigma} = 3.925 \text{ Ом}$, $X_{\mu} = 51.431 \text{ Ом}$.

10.1.3. Расчетные параметры структурной схемы двигателя:

$L_1 = L_{1\sigma} + L_m = 0.009427 + 0.16371 = 0.173137 \text{ Гн}$;

$L'_2 = L'_{2\sigma} + L_m = 0.012 + 0.16371 = 0.17571 \text{ Гн}$;

$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L'_2} = 1 - \frac{0.16371^2}{0.173137 \cdot 0.17571} = 0.119024$;

$R_{\text{пров}} = (0.1 \div 0.2) \cdot R_1 = (1.1 \div 1.2) \cdot 2.535 = 0.03 \text{ Ом}$;

$$R_1^* = R_1 + R_{\text{пров}} = 2.535 + 0.3 = 2.835 \text{ Ом};$$

$$R_{1\text{э}}^* = R_1^* + R_2' \cdot \frac{L_m^2}{L_2'^2} = 2.835 + 1.802 \cdot \frac{0.16371^2}{0.17571^2} = 4.4 \text{ Ом};$$

$$T_{1\text{э}}^* = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_{1\text{э}}^*} = \frac{0.119024 \cdot 0.173137}{4.4} = 0.0046835 \text{ с};$$

$$T_2 = \frac{L_2'}{R_2'} = \frac{0.17571}{1.802} = 0.097508 \text{ с}.$$

10.1.4. Параметры питающей сети: $U_c = 380_{-15\%}^{+10\%} \text{ В}$,
 $U_{\text{сн}} = 380 \text{ В}$, $U_{\text{смин}} = 323 \text{ В}$, $U_{\text{смакс}} = 418 \text{ В}$.

10.1.5. Характеристика и параметры нагрузки:

– нагрузка переменная и активная по характеру;

$$M_{\text{сАмакс}} = 32.69 \text{ Н} \cdot \text{м}; \Delta M_{\text{с мех}} = 3.85 \text{ Н} \cdot \text{м}; J_{\text{мех.мин}} = 0.05 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_{\text{мех.макс}} = 0.1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; J_{\text{эл.мин}} = 0.067 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; J_{\text{эл.макс}} = 0.117 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$k_{J_{\text{мех}}} = \frac{J_{\text{мех.макс}} - J_{\text{мех.мин}}}{M_{\text{сАмакс}}} = \frac{0.1 - 0.05}{32.69} = 0.00153 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 / \text{Н} \cdot \text{м}.$$

10.1.6. Выбор предельных параметров электропривода:

– предварительно принимаем значение максимального тока

$$I_{\text{эл.макс}} = 1.6 \cdot I_{1\text{фн}} = 1.6 \cdot 7.384 = 11.8 \text{ А, тогда}$$

$$\text{mod } \bar{I}_{1\text{макс}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{эл.макс}} = \sqrt{2} \cdot 11.8 = 16.6877 \text{ А};$$

$$I_{1q\text{макс}} = \sqrt{(\text{mod } \bar{I}_{1\text{макс}})^2 - I_{1d\text{н}}^2} = \sqrt{16.6877^2 - 5.27^2} = 15.488 \text{ А};$$

$$M_{\text{эм.макс}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2'} \cdot z_p \cdot \Psi_{2\text{н}} \cdot I_{1q\text{макс}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{0.16371}{0.17571} \cdot 3 \cdot 0.863 \cdot 15.488 = 56.04 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{эл.макс}} = M_{\text{эм.макс}} - \Delta M_{\text{с дв}} = 56.04 - 2.271 = 53.77 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$k_M = \frac{M_{\text{эл.макс}}}{M_{\text{дв.н}}} = \frac{53.77}{30.156} = 1.783.$$

Окончательно принимаем значение максимального тока электропривода

$$I_{\text{эл.макс}} = 11.8 \text{ А}.$$

10.1.7. Выбор преобразователя. Если ориентироваться на преобразователи частоты фирмы *Siemens* из серии *SIMOVER VFDNERDRIVES*, тогда при номинальной мощности двигателя $P_{\text{дв.н}} = 3 \text{ кВт}$, может быть выбран преобразователь с параметрами [20, раздел 8, таблицы 8.18 и 8.22]:

– напряжение питания $U_c = 3 \cdot (380 \div 480)_{-15\%}^{+10\%} \text{ В}$.

– номинальный ток нагрузки $I_{\text{пч.н}} = 8 \text{ А}$;

– базовый ток нагрузки (время цикла 300 с) $I_{\text{пч.баз}} = 0.91 \cdot I_{\text{пч.н}} = 7.3 \text{ А}$;

– выходной ток перегрузки (30 с) $I_{пч.макс} = 1.6 \cdot I_{пч.н} = 12.8 \text{ А}$;

Потребляемый преобразователем ток $I_{пч} = 8.8 \text{ А}$.

При частоте $f_{шим} = 5000 \text{ Гц}$ преобразователь допускает работу с длительным током $I_{пч.длит.доп} = I_{пч.н}$ [20, раздел 8, рисунок 8.13].

10.1.8. Значения максимальной достижимой скорости двигателем при работе на подъем с номинальным потоком и номинальной нагрузкой в зависимости от напряжения промышленной сети

$$\begin{aligned}\omega_{эл.макс}^*(U_c) &= \omega_{дв.н} \cdot \frac{1.35 \cdot (U_{с\min} \div U_{с\max})}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{иф.доп}} = \\ &= 99.484 \cdot \frac{1.35 \cdot (323 \div 418)}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot 231} = (76.66 \div 99.214) \text{ рад/с},\end{aligned}$$

где принято $U_{иф.доп} = 1.05 \cdot U_{1фн} = 1.05 \cdot 220 = 231 \text{ В}$.

Значения максимальной скорости $n_{эл.макс}^*$ соответствуют работе электропривода на предельной характеристике разомкнутой системы. Поэтому работа электропривода с замкнутой обратной связью по скорости возможна только при выполнении условия $n_{эл.макс} < n_{эл.макс}^*$.

Таким образом, обеспечить работу двигателя с номинальной скоростью $n_{дв.н} = 950 \text{ об/мин}$ невозможно в режиме подъема груза даже при повышенном напряжении сети $U_c = 418 \text{ В}$. В режиме спуска груза, наоборот, двигатель будет разгоняться до максимальной скорости по мере заряда конденсатора при любом напряжении сети.

При расчете параметров настройки системы управления электропривода принято значение максимальной скорости $\omega_{эл.макс} = \omega_{дв.н} = 99.484 \text{ рад/с}$, что позволяет при наладке системы принимать любое значение максимальной рабочей скорости из условия $n_{раб.макс} < n_{эл.макс}^*$.

10.1.9. Параметры модели преобразователя частоты [20, приложение 1]:

$f_{шим} = 5000 \text{ Гц}$, $T_{шим} = 1/f_{шим} = 0.0002 \text{ с}$;

Принимаем $\text{mod } u_{1dq\max}^p = \text{mod } u_{1\alpha\beta\max}^p = \text{mod } u_{1abc\max}^p = 1$, тогда

$$k_{пр} = \sqrt{2} \cdot U_{иф.доп} = \sqrt{2} \cdot 231 = 326.7.$$

Принимаем параметры сетевого реактора в соответствии с таблицей 7.1

$R_p = 0.05 \text{ Ом}$, $L_p = 0.6 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$ при расчетном значении номинального тока обмотки фазы

$$I_{рфн} = I_{пч} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot U_{1фн}}{U_c} = 8.8 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot 220}{380} = 8.8 \text{ А}.$$

Принимаем $C = 200 \cdot 3 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$ из условия $C \approx (100 \div 300) \cdot P_n$, мкФ, где P_n – номинальная мощность двигателя, кВт.

Принимаем: $U_{on} = 650 \text{ В}$, $U_{off} = 620 \text{ В}$ для релейного и $U_{d \text{ макс}} = 650 \text{ В}$ для пропорционального регулятора тормозного ключа.

10.1.10. Временной шаг расчета модели $\Delta t = 0.000001 \text{ с}$.

10.1.11. Расчет параметров настройки контуров тока:

– контуры токов I_d и I_q одинаковые;

– принимаем: $T_{к.т} = T_{ацп.дт} = T_{шим} = 0.0002 \text{ с}$, $T_{зу.и} = 0.0002 \text{ с}$, $n_T = 2$,

$N_{ос.т.макс} = 1$, $n_{ацп.дт} = 10$, $T_{ф.от} = 0$;

– принимаем максимальное измеряемое значение тока $I_{изм.макс} = 20 \text{ А}$ из условия $I_{изм.макс} \geq 1.1 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1ф \text{ макс}} = 1.1 \cdot \sqrt{2} \cdot 11.8 = 18.36 \text{ А}$;

– коэффициент передачи датчика тока

$$k_{дт} = \frac{0.5 \cdot 2^{n_{ацп.дт}}}{I_{изм.макс}} = \frac{512}{20} \text{ 1/А};$$

– масштабирующий коэффициент преобразования выходного сигнала датчика тока

$$k_{i \text{ дт}} = \frac{I_{изм.макс}}{0.5 \cdot 2^{n_{ацп.дт}}} = \frac{20}{512} \text{ А};$$

– коэффициент согласования сигнала обратной связи на входе регулятора тока и коэффициент обратной связи по току

$$k_{ос.т} = k_T = \frac{N_{ос.т.макс}}{I_{изм.макс}} = \frac{1}{20} \text{ 1/А};$$

– максимальное значение задания тока на входе контура

$$N_{зт.макс} = k_T \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1ф \text{ макс}} = \frac{1}{20} \cdot \sqrt{2} \cdot 11.8 = 0.8344;$$

– эквивалентная малая постоянная времени контура тока

$$T_{мт \text{ э}} = n_T \cdot \frac{T_{к.т}}{2} + T_{зу.и} + T_{ф.от} = 2 \cdot \frac{0.0002}{2} + 0.0002 + 0 = 0.0004 \text{ с};$$

– постоянная времени регулятора тока

$$T_{рт} = T_{1 \text{ э}}^* = 0.0046835 \text{ с};$$

– коэффициент усиления регулятора тока

$$k_{рт} = \frac{T_{1 \text{ э}}^* \cdot R_{1 \text{ э}}^*}{k_{пр} \cdot k_T \cdot 2 \cdot T_{мт \text{ э}}} = \frac{0.0046835 \cdot 4.4 \cdot 20}{326.7 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 0.0004} = 1.577;$$

– значения выходных сигналов регуляторов тока ограничиваются формирователем управлений инвертором на уровне

$$\text{mod } u_{1d \text{ макс}}^* = 1 \cdot k_y(U_d) \text{ и } \text{mod } u_{1q \text{ макс}}^* = \sqrt{(1 \cdot k_y(U_d))^2 - (u_{1d}^*)^2},$$

где $k_y(U_d) = \frac{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{\text{иф.доп}}}{U_d}$ – коэффициент коррекции управления инвертором в

зависимости от напряжения звена постоянного тока;

– эквивалентная постоянная времени замкнутого контура тока

$$T_{Td} = T_{Tq} = 2 \cdot T_{\mu T\Delta} = 2 \cdot 0.0004 = 0.0008 \text{ с.}$$

10.1.12. Расчет параметров настройки контура потокосцепления без датчика потока:

– принимаем: $T_{k.\Psi} = 0.002 \text{ с}$, $T_{k.\text{набл.}\Psi} = T_{\text{шим}} = 0.0002 \text{ с}$, $n_\Psi = 2$, $T_{\text{ф.о}\Psi} = 0$,

$$N_{\text{ос.}\Psi \text{ макс}} = 1 ;$$

– максимальное расчетное значение потока $\Psi_{2\text{расч.макс}} = 1 \text{ Вб}$ из условия

$$\Psi_{2\text{расч.макс}} \geq 1.1 \cdot \Psi_{2\text{н}} = 1.1 \cdot 0.863 = 0.95 \text{ Вб};$$

– коэффициент согласования сигнала обратной связи на входе регулятора потока и коэффициент обратной связи по потоку

$$k_{\text{ос.}\Psi} = k_\Psi = \frac{N_{\text{ос.}\Psi \text{ макс}}}{\Psi_{2\text{расч.макс}}} = 1 \text{ 1/Вб};$$

– максимальное значение задания потока на входе контура

$$N_{3\Psi \text{ макс}} = k_\Psi \cdot \Psi_{2\text{н}} = 1 \cdot 0.863 = 0.863$$

– эквивалентная малая постоянная времени контура потока

$$T_{\mu\Psi\Delta} = T_{Td} + \frac{T_{k.\Psi}}{n_\Psi} + T_{\text{ф.о}\Psi} = 0.0008 + \frac{0.002}{2} + 0 = 0.0018 \text{ с};$$

– постоянная времени регулятора потока

$$T_{p\Psi} = T_2 = 0.097508 \text{ с};$$

– коэффициент усиления регулятора потока

$$k_{p\Psi} = \frac{T_2 \cdot k_T}{L_m \cdot k_\Psi \cdot 2 \cdot T_{\mu\Psi\Delta}} = \frac{0.097508 \cdot 1}{20 \cdot 0.16371 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 0.0018} = 8.272;$$

– максимальное значение выходного сигнала регулятора потока

$$N_{p\Psi \text{ доп}} = N_{3\Psi \text{ макс}} = 0.8344.$$

10.1.13. Расчет параметров настройки контура скорости с импульсным датчиком:

– принимаем: $T_{k.c} = 0.002 \text{ с}$, $T_{k.\text{дс}} \leq T_{k.c}$, $n_c = 2$, $T_{\text{ф.ос}} = 0$, $N_{\text{ос.с макс}} = 1$;

– коэффициент согласования сигнала обратной связи на входе регулятора скорости и коэффициент обратной связи по скорости

$$k_{\text{ос.с}} = k_c = \frac{N_{\text{ос.с макс}}}{\omega_{\text{изм.макс}}} = \frac{1}{150} \text{ с/рад};$$

– максимальное значение задания скорости на входе контура

$$N_{\text{зс.макс}} = k_c \cdot \omega_{\text{эл.макс}} = \frac{99.484}{150} = 0.6632;$$

– эквивалентная малая постоянная времени контура скорости

$$T_{\text{мсэ}} = T_{\text{тq}} + \frac{1.5 \cdot T_{\text{пк.с}}}{n_c} + T_{\text{ф.ос}} = 0.0008 + \frac{1.5 \cdot 0.002}{2} + 0 = 0.0023 \text{ с};$$

– постоянная времени регулятора скорости

$$T_{\text{рс}} = 4 \cdot T_{\text{мсэ}} = 4 \cdot 0.0023 = 0.0092 \text{ с};$$

– коэффициент усиления регулятора скорости

$$k_{\text{рс}} = \frac{(J_{\text{э мин}} \div J_{\text{э макс}}) \cdot k_{\text{т}}}{\Psi_{2\text{н}} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L'_2} \cdot z_p \cdot k_c \cdot 2 \cdot T_{\text{мсэ}}} = \frac{(0.067 \div 0.117) \cdot 1 \cdot 150}{20 \cdot 0.863 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{0.16371}{0.17571} \cdot 3 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 0.0023} =$$

$$= (30.19 \div 57.72);$$

– допустимое значение выходного сигнала регулятора скорости

$$N_{\text{рс. доп}} = \sqrt{N_{\text{зт. макс}}^2 - N_{\text{рψ}}^2} = \sqrt{0.8344^2 - N_{\text{рψ}}^2}.$$

10.1.14 Расчет параметров настройки задатчика интенсивности скорости с S-образной выходной характеристикой:

– время прямого пуска двигателя до максимальной скорости при максимальных значениях момента инерции привода и статического момента нагрузки, принимаем $\omega_{\text{макс}} = \omega_{\text{эл.макс}} = 100.71 \text{ рад/с}$

$$t_{\text{пр.пуск}} = J_{\text{э макс}} \cdot \frac{\omega_{\text{эл.макс}}}{M_{\text{эл.макс}} - (M_{\text{с макс}} + \Delta M_{\text{с дв}})} =$$

$$= 0.117 \cdot \frac{99.484}{56.04 - (32.69 + 3.85 + 2.271)} = 0.675 \text{ с};$$

– принимаем временной интервал квантования выходного сигнала задатчика

$$T_{\text{к.зи}} = 0.002 \text{ с}; \omega_{\text{эл.макс}} = \omega_{\text{дв.н}} = 99.484 \text{ рад/с}$$

–принимаем $t_1 + t_2 + t_3 = 2 \text{ с}$, $t_1 = t_3 = 0.2 \text{ с}$, $t_2 = 1.6 \text{ с}$, тогда

$$\frac{T_{\text{и1}}}{T_{\text{к.зи}}} = \frac{t_1}{T_{\text{к.зи}}} = \frac{0.2}{0.002} = 100, \quad \frac{T_{\text{и2}}}{T_{\text{к.зи}}} = \frac{(t_1 + t_2)}{T_{\text{к.зи}}} = \frac{1.8}{0.002} = 900,$$

$$k = 0.5 \cdot \frac{T_{\text{и1}}}{T_{\text{и2}}} = 0.5 \cdot \frac{0.2}{1.8} = 0.5/9.$$

10.2. Исследование электропривода на имитационной модели

Исследования проведены на модели REP_AD_Baza_1_3_1000. При настройке модели приняты расчетные параметры настройки в том числе: $k_{\text{рс}} = 30.19$ и

$T_{\text{рс}} = 0.0092 \text{ с}$, $T_{\text{ф.вх}} = 0.0092 \text{ с}$, интервал расчета наблюдателя потока

$T_{\text{к.набл.ψ}} = T_{\text{к.т}}$, параметры датчика скорости $n_{\text{имп.дс}} = 4 \cdot 2500$,

$T_{к.дс} = T_{к.с} = 0.002 \text{ с}$, а для наблюдателя потока использовалось экстраполированное значение сигнала датчика (см. раздел 9).

10.2.1. Оценка влияния напряжения сети на максимально достижимую скорость электропривода.

На рисунке 10.1, а приведены диаграммы напряжения $U_d(t)$, тока $I_{1ф}(t)$, момента $M_{эм}(t)$ и скорости $\omega_{дв}(t)$ двигателя, иллюстрирующие работу электропривода в режиме подъема максимального груза с максимальной скоростью и ступенчатым изменением напряжения сети: 342, 380 и 418 В. На рисунке 10.1, б для тех же условий приведены диаграммы заданной $\omega_{зад}(t)$ и фактической $\omega_{дв}(t)$ скорости двигателя.

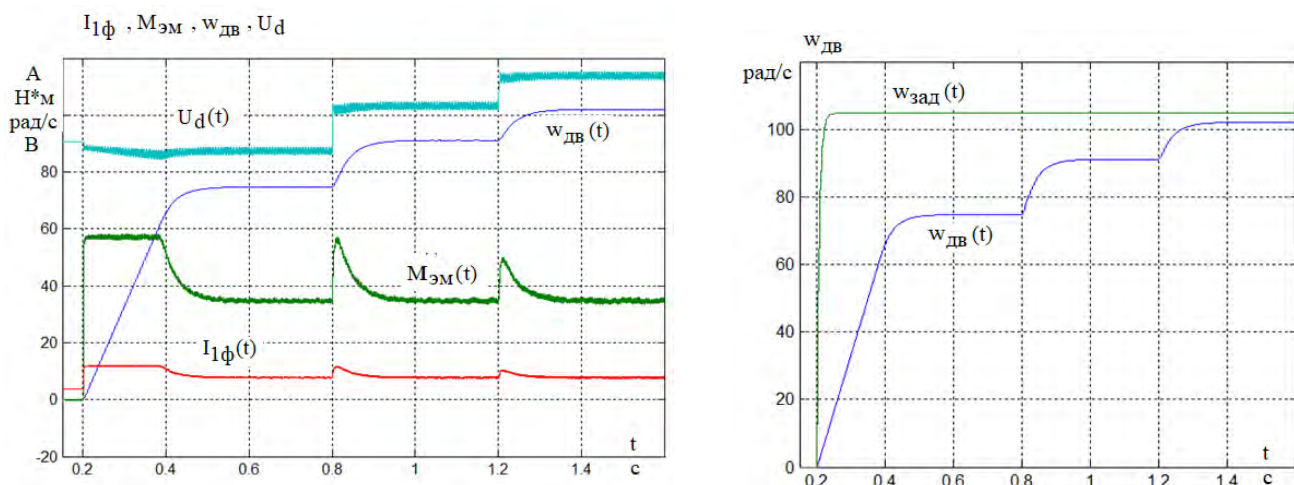


Рисунок 10.1 – Работа замкнутой системы электропривода при последовательном изменении напряжения сети: 342, 380 и 418 В

На рисунке 10.2 приведены диаграммы напряжения звена постоянного тока $U_d(t)$, тока $I_{1ф}(t)$, момента $M_{эм}(t)$ и скорости $\omega_{дв}(t)$ двигателя, иллюстрирующие работу замкнутой системы электропривода при напряжении сети $U_{с мин} = 323 \text{ В}$, заданной скорости $\omega_{зад} = 104.71 \text{ рад/с}$ и плавном изменении момента нагрузки. На рисунке 10.3 приведена предельная механическая характеристика электропривода, полученная при тех же условиях, но с разомкнутым контуром скорости и без токоограничения.

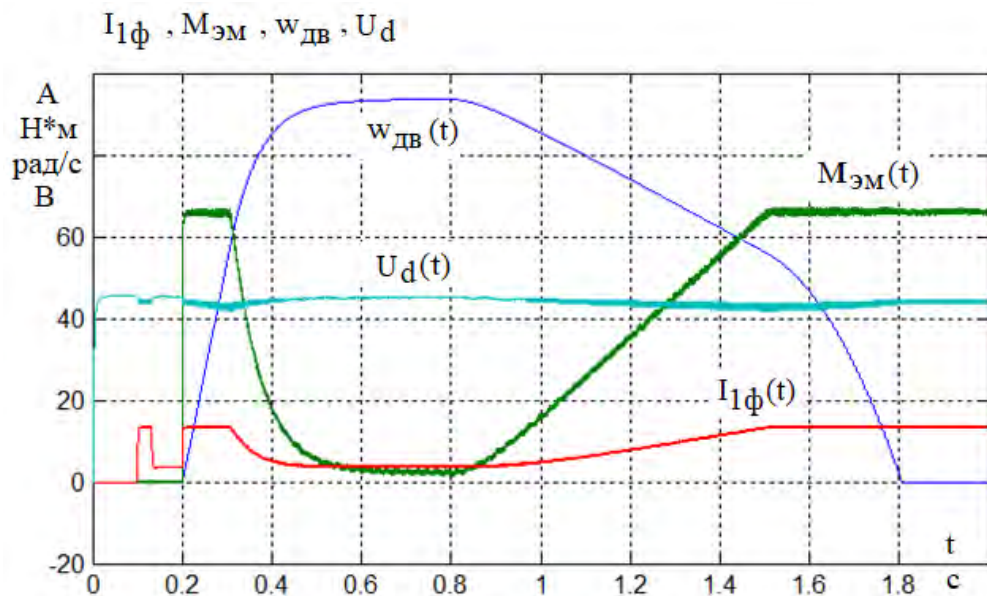


Рисунок 10.2 – Работа замкнутой системы электропривода при $U_{с\text{мин}} = 323 \text{ В}$, $\omega_{\text{зад}} = 104.71 \text{ рад/с}$ и плавном изменении момента нагрузки

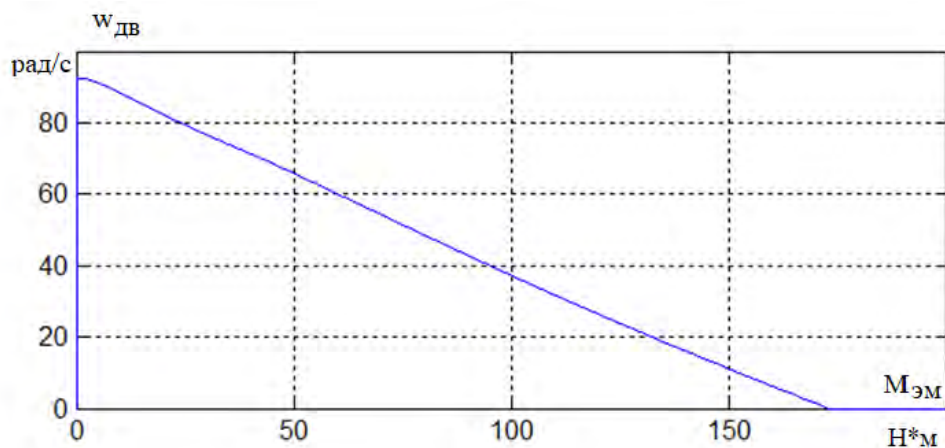


Рисунок 10.3 – Предельная механическая характеристика электропривода с разомкнутой обратной связью по скорости и без токоограничения при напряжении сети $U_{с\text{мин}} = 323 \text{ В}$

На рисунке 10.4 представлено семейство предельных характеристик электропривода с разомкнутой обратной связью по скорости, соответствующих напряжениям $U_{с\text{макс}} = 418 \text{ В}$, $U_{сн} = 380 \text{ В}$ и $U_{с\text{мин}} = 323 \text{ В}$.

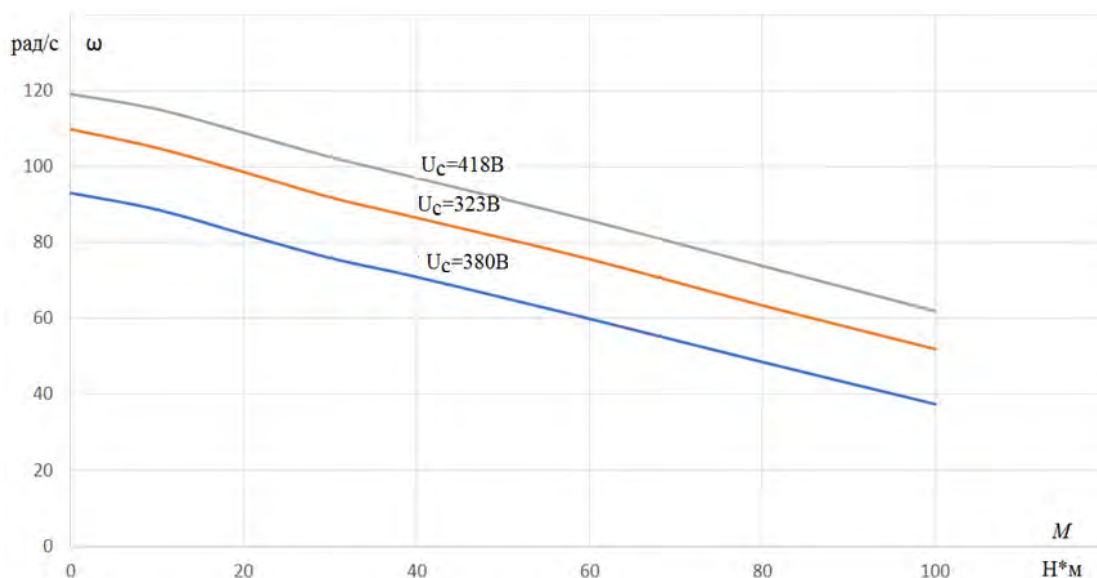


Рисунок 10.4 – Семейство предельных характеристик электропривода с разомкнутой обратной связью по скорости, соответствующие напряжениям сети $U_{с\text{ макс}} = 418 \text{ В}$, $U_{сн} = 380 \text{ В}$ и $U_{с\text{ мин}} = 323 \text{ В}$

На рисунке 10.5 приведены диаграммы напряжения звена постоянного тока $U_d(t)$, фазного тока $I_{1\phi}(t)$, электромагнитного момента $M_{эм}(t)$ и скорости $\omega_{дв}(t)$ двигателя, иллюстрирующие работу замкнутой системы электропривода при напряжении сети $U_{с\text{ мин}} = 323 \text{ В}$, заданной скорости $\omega_{зад} = 104.71 \text{ рад/с}$ и плавном изменении момента нагрузки.

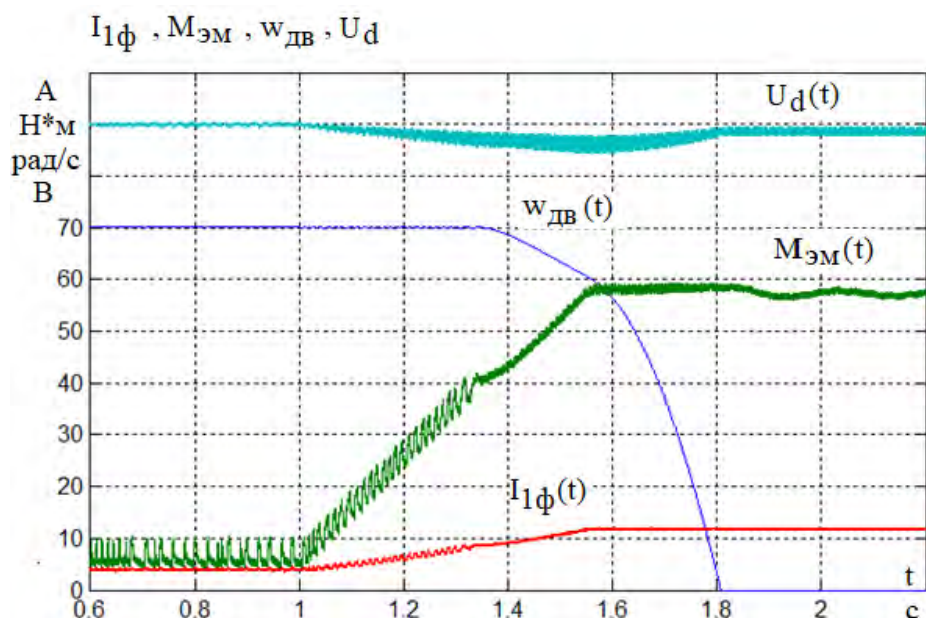


Рисунок 10.5 – Работа замкнутой системы электропривода при напряжении сети $U_{с\text{ мин}} = 323 \text{ В}$, заданной скорости $\omega_{зад} = 70 \text{ рад/с}$ и плавном изменении момента нагрузки

Выводы к п. 10.2.1. 1. При недостаточном напряжении сети, точнее звена постоянного тока, двигатель работает на предельной характеристике разомкнутой по скорости системы электропривода при заданном моменте и насыщении регулятора скорости.

2. При заданном изменении напряжения сети $323 \div 418$ В значение максимальной скорости электропривода должно удовлетворять условию $\omega_{\text{раб.макс}} < \omega_{\text{эл.макс}}^*(U_{\text{с мин}}) = 74.7$ рад/с. Далее принято $\omega_{\text{раб.макс}} = 70$ рад/с.

10.2.2. Оценка работоспособности электропривода с активной нагрузкой.

Диаграммы напряжения звена постоянного тока, тока, момента и скорости двигателя $\omega_{\text{дв}}(t)$, приведенные на рисунках 10.6 и 10.7 иллюстрируют работу электропривода в режимах подъема и спуска максимального груза при выбранной максимальной рабочей скорости $\omega_{\text{раб.макс}} = 70$ рад/с.

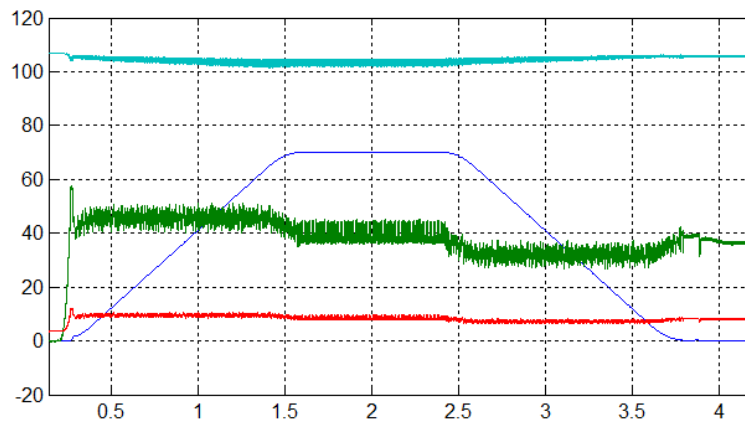


Рисунок 10.6 – Работа электропривода в режиме подъема максимального груза при заданной скорости $\omega_{\text{зад}} = \omega_{\text{раб.макс}} = 70$ рад/с

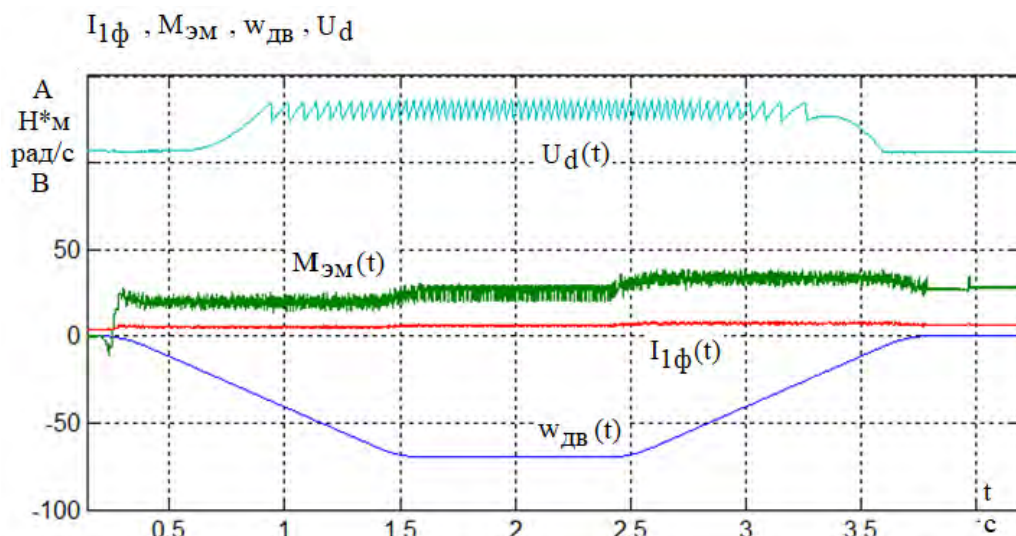


Рисунок 10.7 – Работа электропривода в режиме спуска максимального груза при заданной скорости $\omega_{\text{зад}} = \omega_{\text{раб.макс}} = -70$ рад/с

Диаграммы напряжения звена постоянного тока $U_d(t)$, фазного действующего тока $I_{1\phi}(t)$, электромагнитного момента $M_{эм}(t)$ и скорости двигателя $\omega_{дв}(t)$, приведенные на рисунках 10. 8 иллюстрируют работу электропривода в режимах подъема и спуска максимального груза при заданной скорости $\omega_{зад} = \pm 1.4$ рад/с .

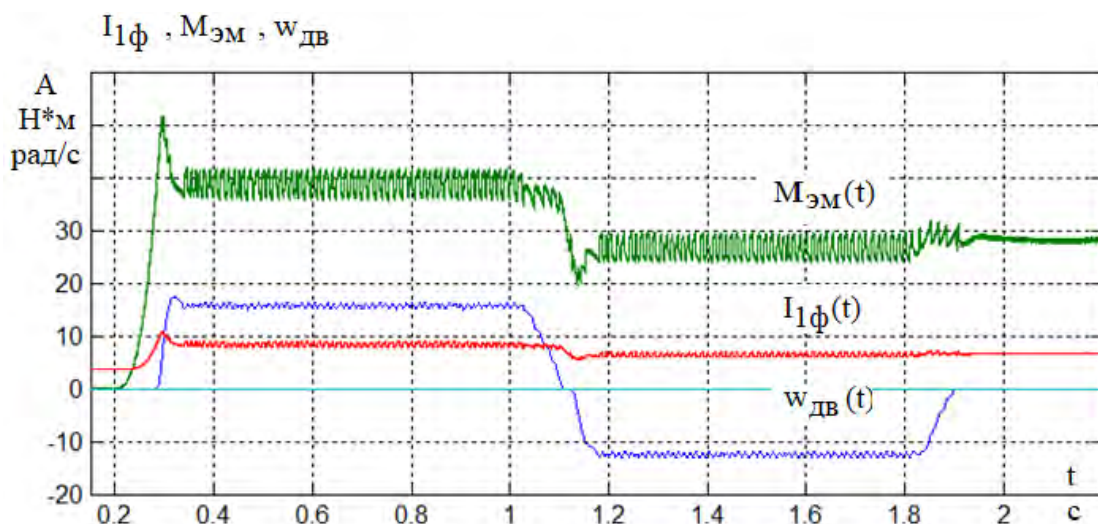


Рисунок 10.8 – Работа электропривода в режимах подъема и спуска максимального груза при заданной скорости $\omega_{зад} = \pm 1.4$ рад/с

Вывод к п. 10.2.2. Электропривод с простым наблюдателем потока на базе модели ротора одинаково хорошо работает при реактивном и активном характере нагрузки.

10.2.3. Оценка качества работы регулируемого электропривода

1. Оценка статической ошибки по управлению и возмущению. На рисунке 10.9 приведены диаграммы тока $I_{1\phi}(t)$, электромагнитного момента $M_{эм}(t)$ и скорости $\omega_{дв}(t)$ двигателя, а на рисунке 10.10 – диаграммы заданной $\omega_{зад}(t)$, фактической $\omega_{дв}(t)$ и измеренной импульсным датчиком $\omega_{изм}(t)$ скорости, соответствующие работе электропривода с $\omega_{зад} = 1.4$ рад/с и плавным увеличением статического момента нагрузки $M_{сА}(t)$,

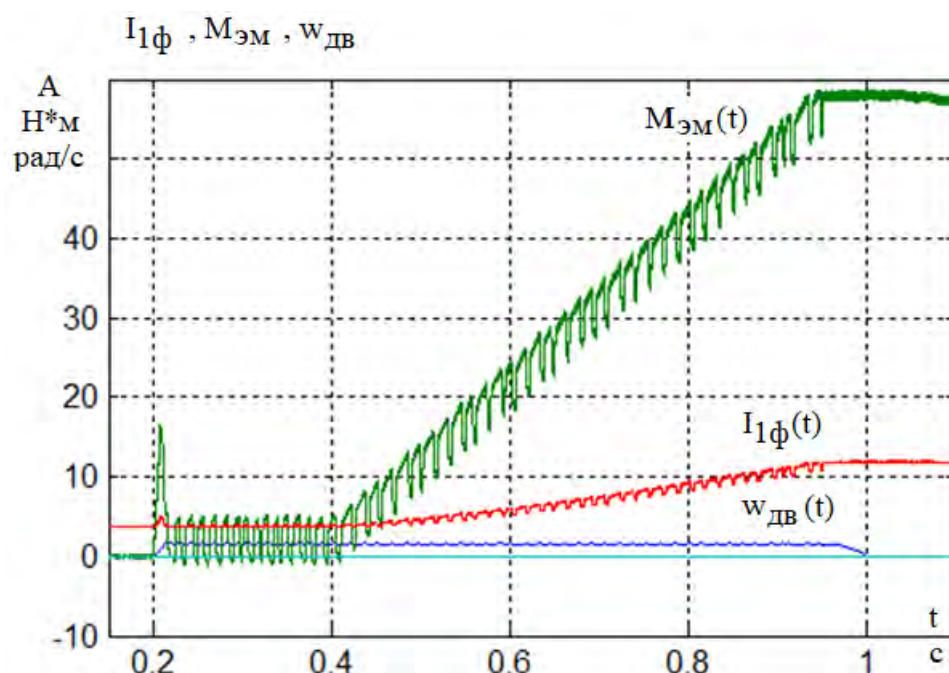


Рисунок 10.9 – Работа электропривода с заданной скоростью $\omega_{\text{зад}} = 1.4$ рад/с и плавным изменением статического момента нагрузки

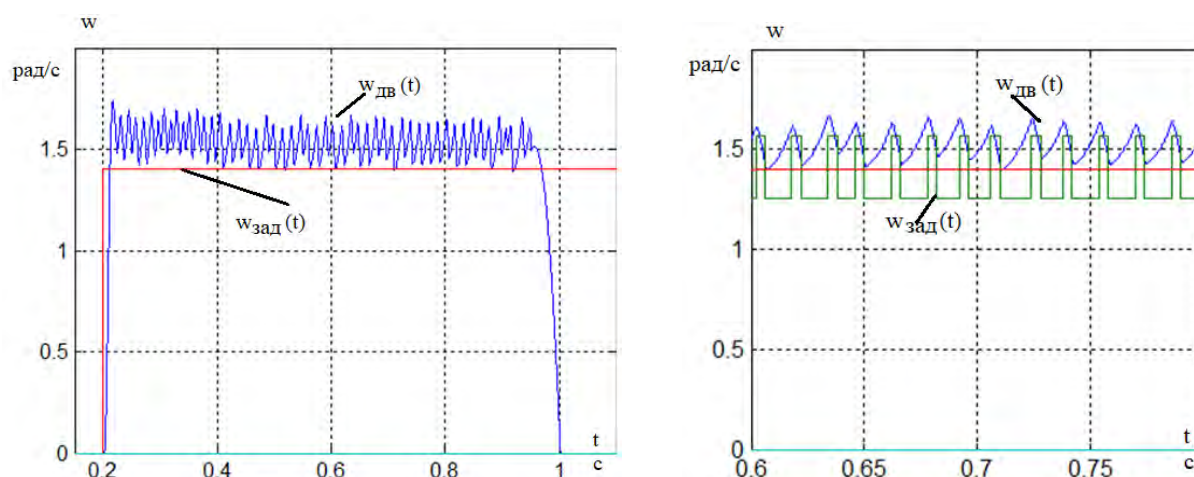


Рисунок 10.10 – Диаграммы заданной $\omega_{\text{зад}}(t)$, фактической $\omega_{\text{дв}}(t)$ и измеренной импульсным датчиком $\omega_{\text{изм}}(t)$ скорости двигателя

2. Оценка отработки ступенчатого управляющего воздействия. Ожидаемые значения перерегулирования отработки ступенчатого входного воздействия с входным фильтром не превышают 10%, без входного фильтра могут превысить 43% (см. раздел 6). На рисунке 10.11 приведены диаграммы тока $I_{1\phi}(t)$, электромагнитного момента $M_{\text{эм}}(t)$ и скорости $\omega_{\text{дв}}(t)$ двигателя, соответствующие отработке электроприводом на холостом ходу ступенчатого управляющего воздействия $\omega_{\text{зад}} = 1.4$ рад/с, масштаб скорости $m_{\omega} = 5$.

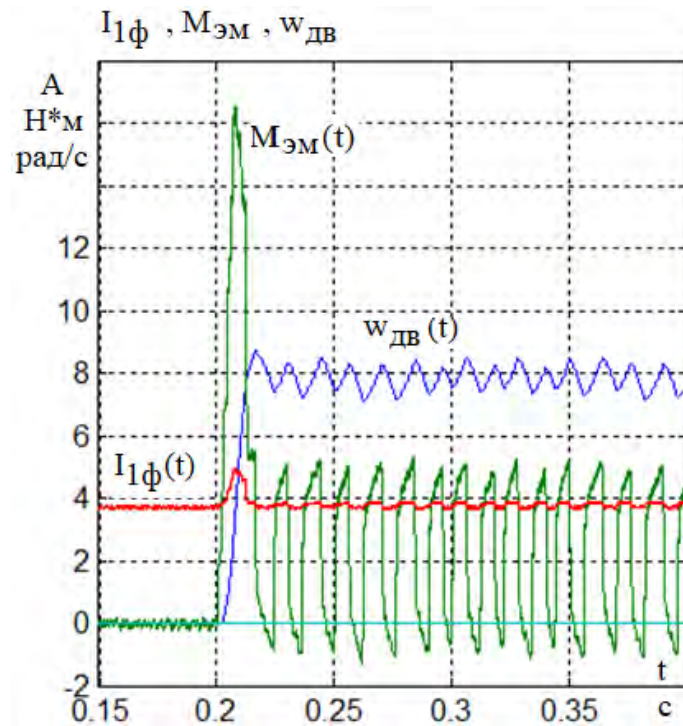


Рисунок 10.11 – Отработка электроприводом ступенчатого воздействия $\omega_{\text{зад}} = 1.4 \text{ рад/с}$: с фильтром на входе;

3. Оценка динамической ошибки по возмущению. На рисунке 10.12 приведены диаграммы тока $I_{1\phi}(t)$, электромагнитного момента $M_{\text{эм}}(t)$ и скорости $\omega_{\text{дв}}(t)$ двигателя, соответствующие работе электропривода с заданной скоростью $\omega_{\text{зад}} = 4.2 \text{ рад/с}$ и ступенчатом изменении статического момента нагрузки $\Delta M_{\text{с}} = \pm M_{\text{дв.н}} = \pm 30.156 \text{ Н} \cdot \text{м}$, масштаб скорости $m_{\omega} = 5$. Расчетные значения динамического провала и всплеска скорости двигателя (раздел 6)

$$\Delta \omega_{\text{в.макс}} \approx \mu \frac{1.75 \cdot T_{\mu\text{сэ}}}{J_{\text{э}}} \cdot \Delta M_{\text{с}} = \mu \frac{1.75 \cdot 0.0023}{0.067} \cdot 30.156 = \pm 1.81 \text{ рад/с}.$$

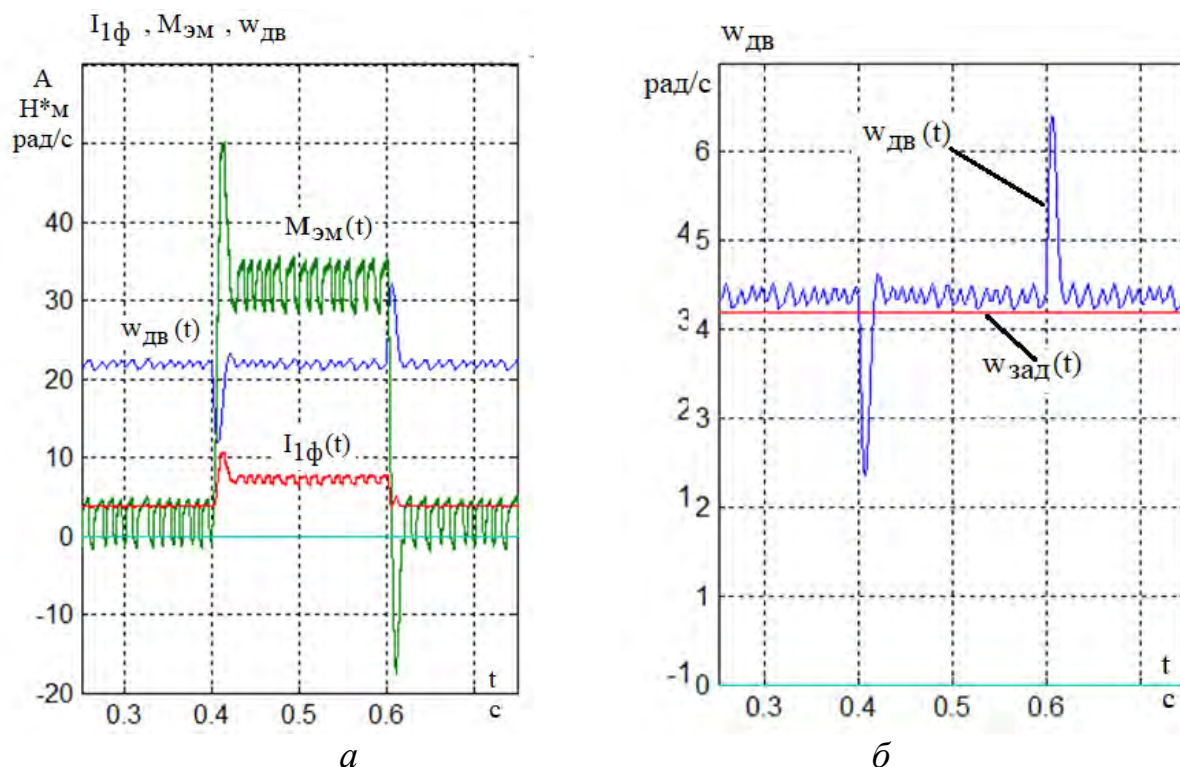


Рисунок 10.12 – Диаграммы тока, электромагнитного момента и скорости двигателя, иллюстрирующие реакцию электропривода на ступенчатое изменение момента нагрузки $\Delta M_c = \pm 30.156 \text{ Н} \cdot \text{м}$

4. Оценка полосы пропускания электропривода. Расчетные значения полосы пропускания контура скорости с фильтром и без фильтра на входе, соответственно, равны

$$f_{\Pi} \geq \frac{0.36}{2\pi \cdot T_{\mu\epsilon\epsilon}} = \frac{0.36}{2\pi \cdot 0.0023} = 24.9 \text{ Гц}, \quad f_{\Pi} \geq \frac{0.36}{2\pi \cdot T_{\mu\epsilon\epsilon}} = \frac{0.59}{2\pi \cdot 0.0023} = 40.83 \text{ Гц}.$$

Частотные характеристики сняты в режиме холостого хода с дополнительным моментом инерции $J_{мех.мин} = 0.05 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Входной сигнал квантован с интервалом $T_{к.зад} = 0.002 \text{ с}$. Результаты представлены на рисунках 10.13 и 10.14.

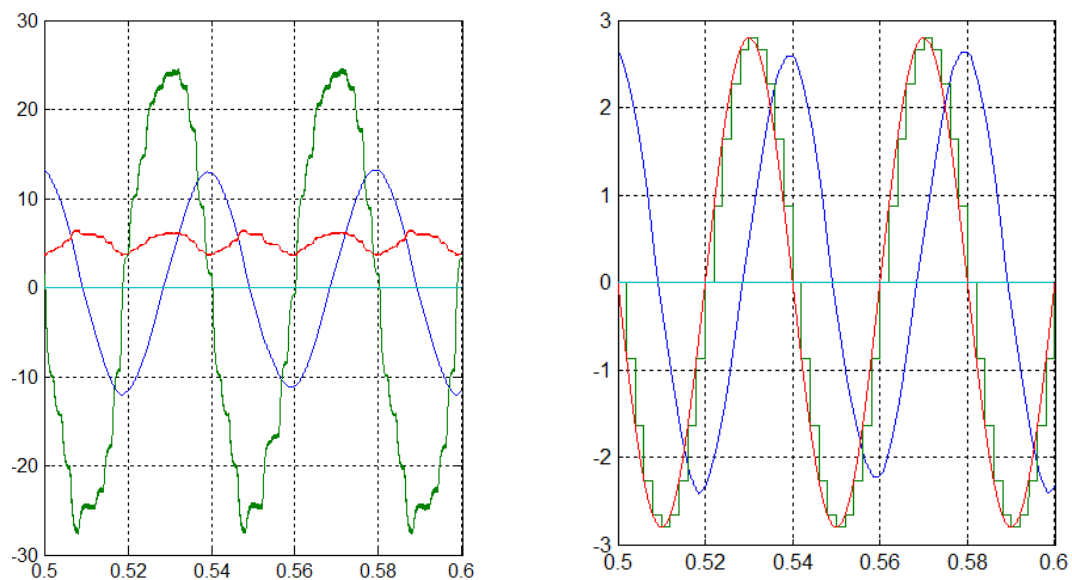


Рисунок 10.13 – Обработка входного сигнала $\omega_{\text{зад}}(t) = 4 \cdot \sin(2\pi \cdot 25)$ электроприводом с фильтром на входе контура скорости

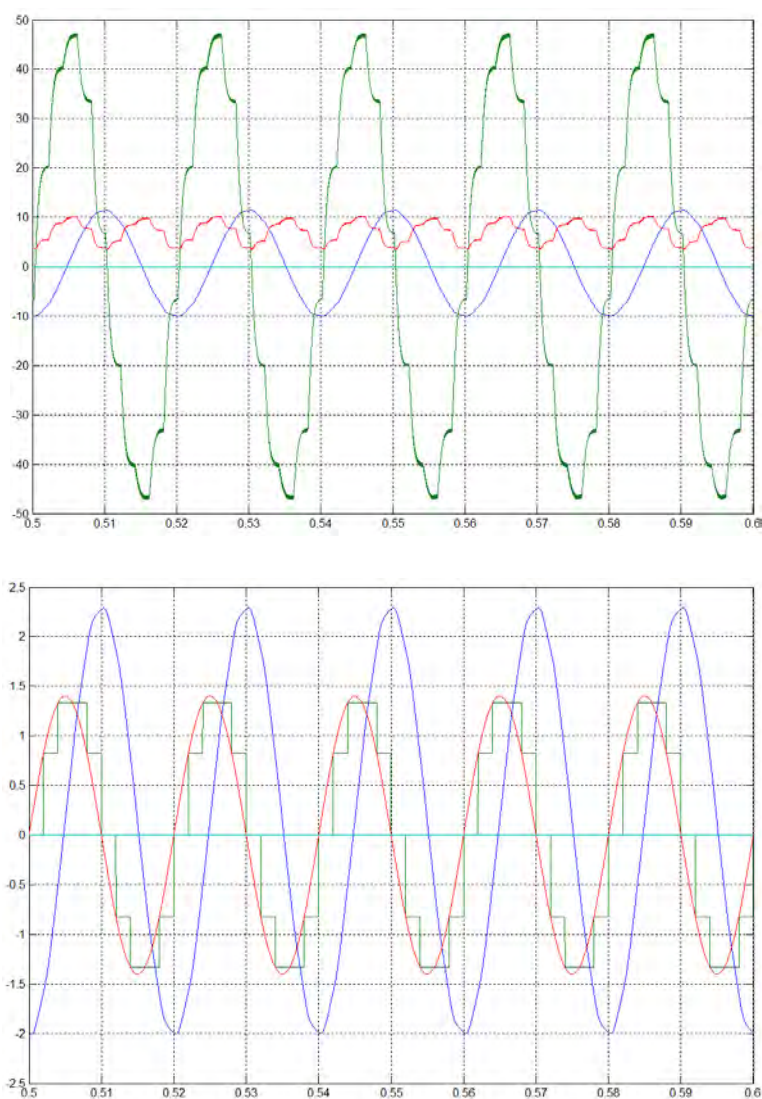


Рисунок 10.14 – Обработка входного сигнала $\omega_{\text{зад}}(t) = 2 \cdot \sin(2\pi \cdot 50)$ электроприводом без фильтра на входе контура скорости

Вывод к п. 10.2.3. 1. Полученные при моделировании показатели качества работы электропривода, подтверждают ожидаемые расчетные значения. Имеет место статическая ошибка по управлению, обусловленная дискретностью измерения скорости по уровню.

Общие выводы к разделу 10

1. Предложенная модель однозонного асинхронного электропривода с частотным векторным управлением и простым наблюдателем потока двигателя работоспособна, а методика при известных параметрах двигателя позволяет рассчитать параметры и настроить САУ электропривода с импульсным датчиком скорости.

2. Использование для наблюдателя потока экстраполированное значение сигнала импульсного датчика скорости (см. раздел 9) приводит к уменьшению пульсаций тока и момента двигателя.

3. Регулировочные свойства, статические и динамические характеристики электропривода с наблюдателем потока на базе модели ротора полностью определяются параметрами импульсного датчика скорости: числом импульсов на оборот и временным интервалом оцифровки.

Раздел 11. Бездатчиковый асинхронного электропривода с частотным векторным управлением

Для реализации модели бездатчикового электропривода с частотным векторным управлением принята структура с адаптивным наблюдателем скорости двигателя. Расчет параметров наблюдателя выполнен по методике, изложенной в разделе 6 настоящей работы.

Цель исследований:

1. Проверить разработанную модель электропривода и методику расчета параметров настройки САУ бездатчикового электропривода, изложенную в [20, 21], и рекомендаций по её применению для цифровых систем, сделанные в разделах 5 и 6.

2. Оценить работоспособность выбранной структуры бездатчикового электропривода с адаптивным наблюдателем скорости двигателя при работе с нагрузкой реактивного характера.

11.1. Бездатчиковый асинхронного электропривода с двигателем RA200L4 мощностью 30 кВт

Параметры двигателя, преобразователя, силового канала и системы регулирования электропривода с двигателем RA200L4 приведены в разделе 9.

При исследовании приняты следующие параметры электропривода:

$$M_{сР\max} = 180.48 \text{ Н} \cdot \text{м}; J_{\text{мех}} = J_{\text{дв}} = 0.194 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \omega_{\text{эл.макс}} = 150 \text{ рад/с};$$

$$\omega_{\text{раб.макс}} = 100 \text{ рад/с} \text{ и } \omega_{\text{раб.мин}} = 3 \text{ рад/с}.$$

Модель приведена на компакт диске – REP_AD_Baza_bdc_30_1500.

11.1.1. Расчет параметров настройки адаптивного наблюдателя потокосцепления ротора с ПИ-регулятором:

$$\text{– постоянная времени регулятора } T_{\text{рег.набл}\Psi} = T_2 = 0.40214 \text{ с};$$

$$\text{– коэффициент усиления регулятора } k_{\text{рег.набл}\Psi} = 10 \cdot k_{p\Psi} = 10 \cdot 19 = 190;$$

– временной интервал расчета принимаем $T_{\text{к.набл}\Psi} = T_{\text{к.т}} = 0.0002 \text{ с}$ из условия

$$T_{\text{к.набл}\Psi} \leq \frac{T_2}{2 \cdot k_{\text{рег.набл}\Psi}} = \frac{0.40214}{2 \cdot 190} = 0.001058 \text{ с}.$$

11.1.2. Расчет параметров настройки адаптивного наблюдателя скорости с ПИ-регулятором:

– коэффициент усиления регулятора

$$k_{\text{рег.набл}\omega} = 10 \cdot k_{p\omega} = 10 \cdot 47.49 = 474.9;$$

– малая постоянная времени контура

$$T_{\mu \text{набл}\omega} = \frac{T_2}{2 \cdot k_{\text{рег.набл}\omega}} = \frac{0.40214}{2 \cdot 474.9} = 0.000423 \text{ с};$$

– постоянная времени регулятора

$$T_{\text{рег.набл}\omega} = 4 \cdot T_{\mu\text{набл}\omega} = 4 \cdot 0.000423 = 0.0017 \text{ с};$$

– принимаем интервал расчета наблюдателя $T_{\text{к.набл}\omega} = 0.0002 \text{ с}$ из условий:

$$T_{\text{к.набл}\omega} \leq T_{\mu\text{набл}\omega} = 0.000423 \text{ с}; \quad T_{\text{к.набл}\omega} \geq T_{\text{к.т}} = 0.0002 \text{ с};$$

– принимаем постоянную времени фильтра в цепи обратной связи по скорости $T_{\text{ф.ос}}^* = 0.005 \text{ с}$ из условия $T_{\text{ф.ос}}^* \geq 2 \cdot T_{\mu\text{сэ}} = 2 \cdot 0.0018 = 0.0036 \text{ с};$

– изменяем параметры настройки регулятора скорости:

$$T_{\mu\text{сэ}}^* = T_{\mu\text{сэ}} + T_{\text{ф.ос}}^* = 0.0018 + 0.005 = 0.0068 \text{ с},$$

$$T_{\text{рс}}^* = b_c \cdot a_c \cdot T_{\mu\text{сэ}}^* = 2 \cdot 2 \cdot 0.0068 = 0.0272 \text{ с},$$

$$k_{\text{рс}}^* = k_{\text{рс}} \cdot \frac{T_{\mu\text{сэ}}}{T_{\text{рс}}^* / (b_c \cdot a_c)} = 47.49 \cdot \frac{0.0018}{0.0272 / (2 \cdot 2)} = 12.57.$$

11.1.3. Расчет параметров настройки задатчика интенсивности скорости с S-образной выходной характеристикой:

– принимаем временной интервал квантования выходного сигнала задатчика скорости $T_{\text{к.зи}} = 0.002 \text{ с};$

– для задатчика с S-образной характеристикой (см. рисунок 1.2) из условия $t_1 + t_2 > t_{\text{пр.пуск}}$ выбираем $t_1 + t_2 + t_3 = 1.6 \text{ с}$, $t_1 = t_3 = 0.4 \text{ с}$, $t_2 = 0.8 \text{ с}$, тогда параметры настройки:

$$\frac{T_{\text{и1}}}{T_{\text{к.зи}}} = \frac{t_1}{T_{\text{к.зи}}} = \frac{0.4}{0.002} = 200, \quad \frac{T_{\text{и2}}}{T_{\text{к.зи}}} = \frac{(t_1 + t_2)}{T_{\text{к.зи}}} = \frac{1.2}{0.002} = 600,$$

$$k = 0.5 \cdot \frac{T_{\text{и1}}}{T_{\text{и2}}} = 0.5 \cdot \frac{0.4}{1.2} = 0.5/3.$$

11.1.3. Результаты имитационных исследований.

Имитационная модель настроена в полном соответствии с расчетными параметрами.

На рисунках 11.1 – 11.4 приведены диаграммы тока $I_{1\text{ф}}(t)$, электромагнитного момента $M_{\text{эм}}(t)$ и скорости $\omega_{\text{дв}}(t)$ двигателя, полученные в результате исследований.

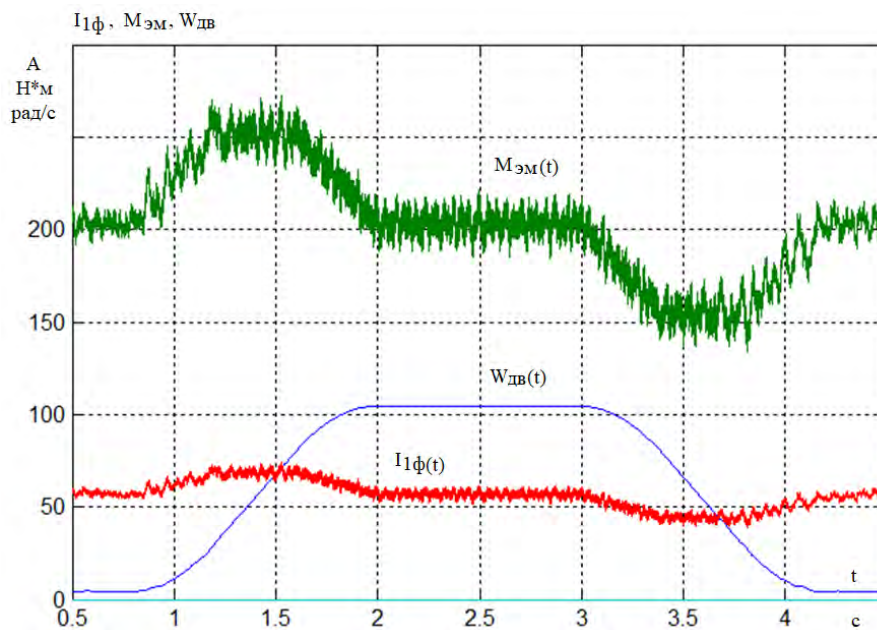


Рисунок 11. 1 – Обработка электроприводом задания $\omega_{\text{зад}} = \omega_{\text{раб.макс}}$ при управлении от задатчика интенсивности и $M_{\text{сРмакс}}$

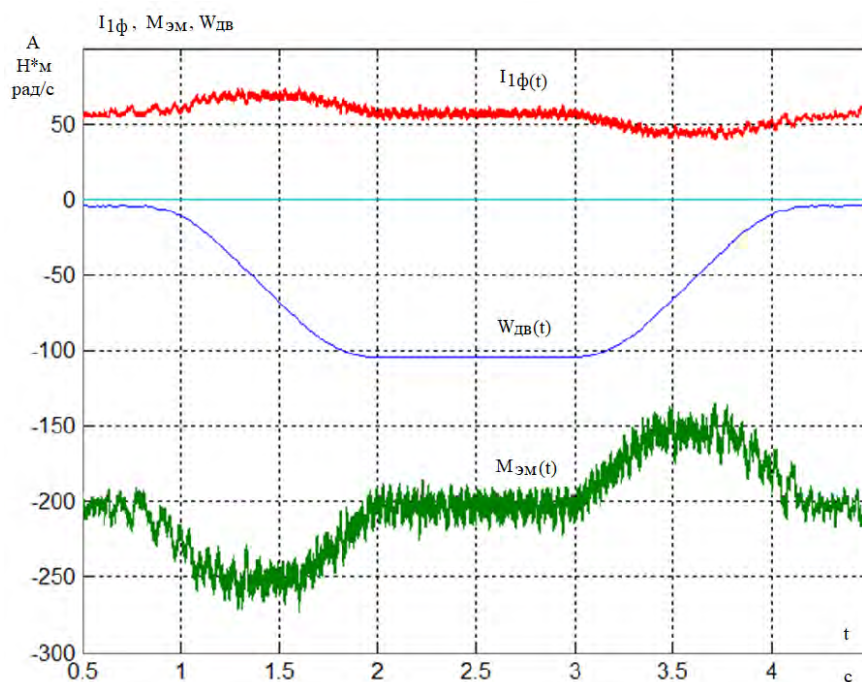


Рисунок 11. 2 – Обработка электроприводом задания $\omega_{\text{зад}} = -\omega_{\text{раб.макс}}$ при управлении от задатчика интенсивности и $M_{\text{сРмакс}}$

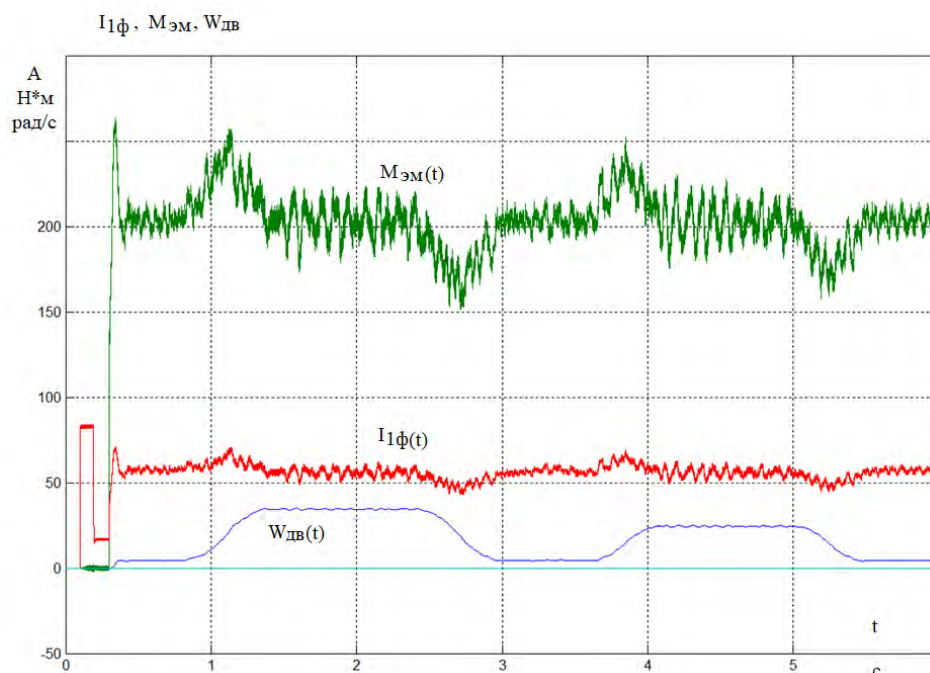


Рисунок 11. 3 – Последовательная отработка электроприводом заданий $\omega_{\text{зад}1} = 0.3 \cdot \omega_{\text{раб.макс}}$ и $\omega_{\text{зад}2} = 0.2 \cdot \omega_{\text{раб.макс}}$ при управлении от задатчика интенсивности скорости и $M_{\text{сРмакс}}$

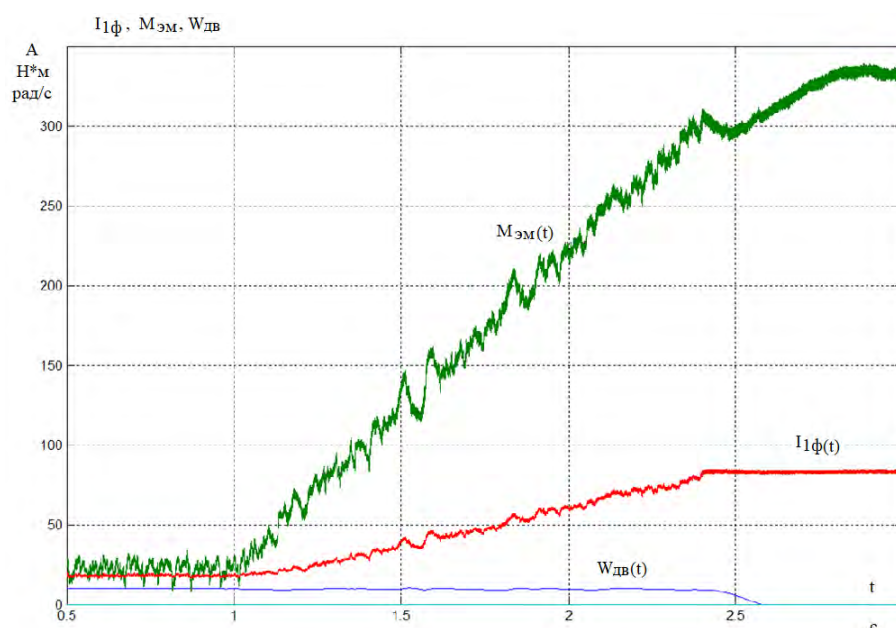


Рисунок 11.4 – Работа электропривода с заданной скоростью $\omega_{\text{зад}} = 0.1 \cdot \omega_{\text{раб.макс}}$ в режиме плавного увеличения момента нагрузки

11.2. Бездатчиковый асинхронного электропривода с двигателем АИР112МА6 мощностью 3 кВт

Параметры двигателя, преобразователя, силового канала и системы регулирования электропривода с двигателем АИР112МА6 приведены в разделе 10. При исследовании приняты следующие параметры электропривода:

$M_{сР\text{макс}} = 32.69 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $J_{\text{мех.макс}} = 0.1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $\omega_{\text{раб.макс}} = 70 \text{ рад/с}$ и $\omega_{\text{раб.мин}} = 2 \text{ рад/с}$.

Модель приведена на компакт диске – REP_AD_Baza_bdc_3_1000.

11.2.1. Расчет параметров настройки адаптивного наблюдателя потокосцепления ротора с ПИ-регулятором:

- постоянная времени $T_{\text{рег.набл}\Psi} = T_2 = 0.097508 \text{ с}$;
- коэффициент усиления $k_{\text{рег.набл}\Psi} = 10 \cdot k_{p\Psi} = 10 \cdot 8.272 = 82.72$;
- временной интервал расчета принимаем $T_{\text{к.набл}\Psi} = T_{\text{к.т}} = 0.0002 \text{ с}$ из

условия

$$T_{\text{к.набл}\Psi} \leq \frac{T_2}{2 \cdot k_{\text{рег.набл}\Psi}} = \frac{0.097508}{2 \cdot 82.72} = 0.00059 \text{ с}.$$

11.2.2. Расчет параметров настройки адаптивного наблюдателя скорости с ПИ-регулятором:

- коэффициент усиления регулятора

$$k_{\text{рег.набл}\omega} = 10 \cdot k_{pc} = 10 \cdot 38.577 = 385.77;$$

- малая постоянная времени контура

$$T_{\mu \text{набл}\omega} = \frac{T_2}{2 \cdot k_{\text{рег.набл}\omega}} = \frac{0.097508}{2 \cdot 385.77} = 0.0001264 \text{ с};$$

- постоянная времени регулятора

$$T_{\text{рег.набл}\omega} = 4 \cdot T_{\mu \text{набл}\omega} = 4 \cdot 0.0001264 = 0.0005 \text{ с};$$

- принимаем интервал расчета наблюдателя $T_{\text{к.набл}\omega} = 0.0002 \text{ с}$;

– принимаем постоянную времени фильтра в цепи обратной связи по скорости $T_{\text{ф.ос}}^* = 0.004 \text{ с}$ из условия $T_{\text{ф.ос}}^* \geq 2 \cdot T_{\mu \text{сэ}} = 2 \cdot 0.0018 = 0.0036 \text{ с}$;

- изменяем параметры настройки регулятора скорости:

$$T_{\mu \text{сэ}}^* = T_{\mu \text{сэ}} + T_{\text{ф.ос}}^* = 0.0018 + 0.004 = 0.0058 \text{ с},$$

$$T_{pc}^* = b_c \cdot a_c \cdot T_{\mu \text{сэ}}^* = 2 \cdot 2 \cdot 0.0058 = 0.0232 \text{ с},$$

$$k_{pc}^* = k_{pc} \cdot \frac{T_{\mu \text{сэ}}}{T_{pc}^* / (b_c \cdot a_c)} = 38.577 \cdot \frac{0.0018}{0.0232 / (2 \cdot 2)} = 11.97.$$

11.2.3. Результаты имитационных исследований.

Исследования проведены на модели REP_AD_Baza_bdc_3_1000.

Имитационная модель настроена в полном соответствии с расчетными параметрами.

На рисунках 11.2.1 – 11.2.5 приведены диаграммы тока $I_{1\phi}(t)$, электромагнитного момента $M_{\text{эм}}(t)$ и скорости $\omega_{\text{дв}}(t)$ двигателя, полученные в результате исследований.

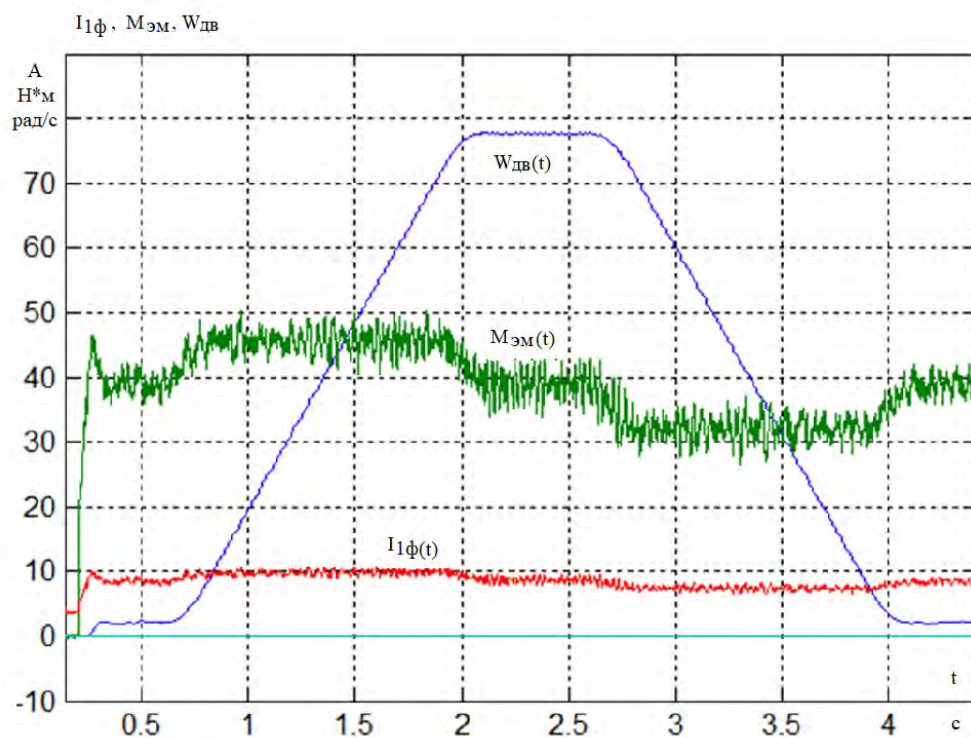


Рисунок 11.2.1 – Отработка электроприводом задания $\omega_{\text{зад}} = \omega_{\text{раб.макс}}$ при управлении от задатчика интенсивности и $M_{\text{ср.макс}}$

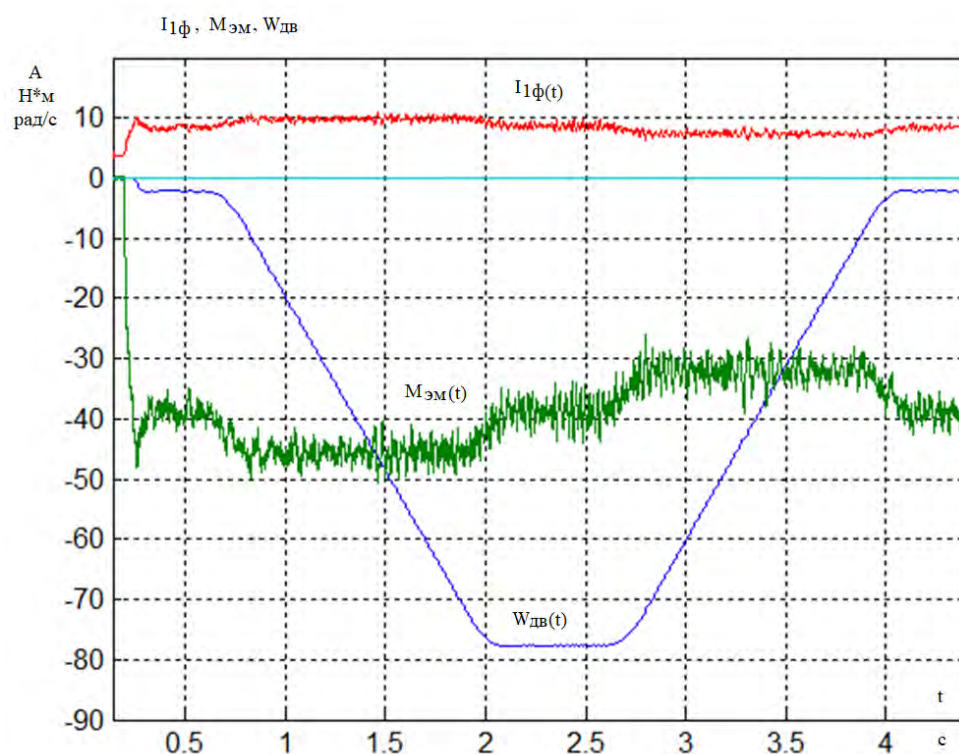


Рисунок 11.2.2 – Отработка электроприводом задания $\omega_{\text{зад}} = -\omega_{\text{раб.макс}}$ при управлении от задатчика интенсивности и $M_{\text{ср.макс}}$

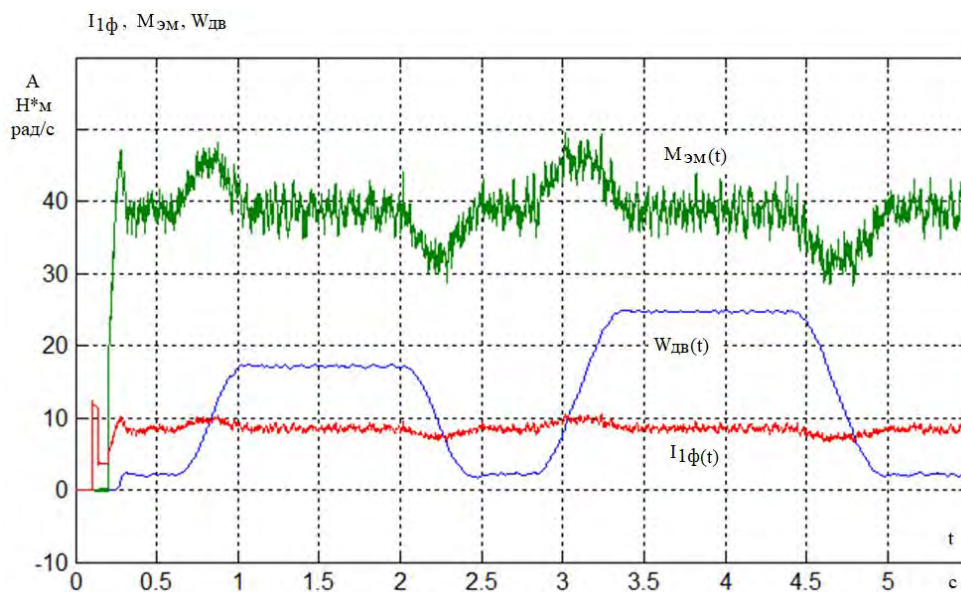


Рисунок 11.2.3 – Последовательная отработка электроприводом заданий $\omega_{\text{зад1}} = 0.2 \cdot \omega_{\text{эл.макс}}$ и $\omega_{\text{зад2}} = 0.3 \cdot \omega_{\text{эл.макс}}$ при управлении от задатчика интенсивности скорости и $M_{\text{ср.макс}}$

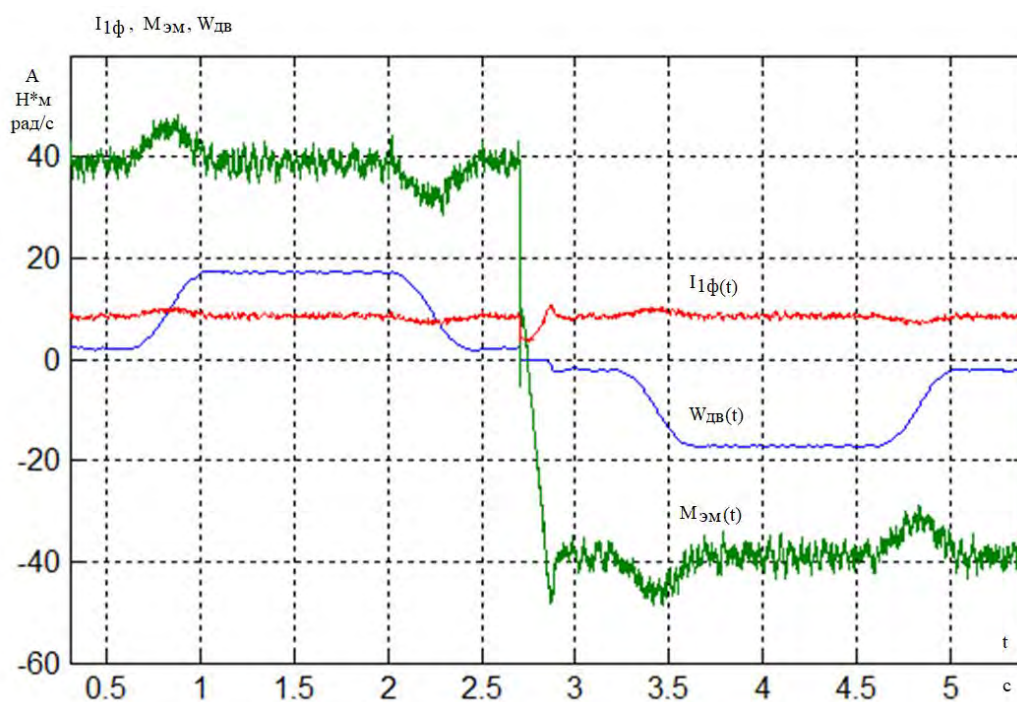


Рисунок 11.2.4 – Последовательная отработка электроприводом заданий $\omega_{\text{зад1}} = 0.2 \cdot \omega_{\text{эл.макс}}$ и $\omega_{\text{зад2}} = -0.2 \cdot \omega_{\text{эл.макс}}$ при управлении от задатчика интенсивности скорости и $M_{\text{ср.макс}}$

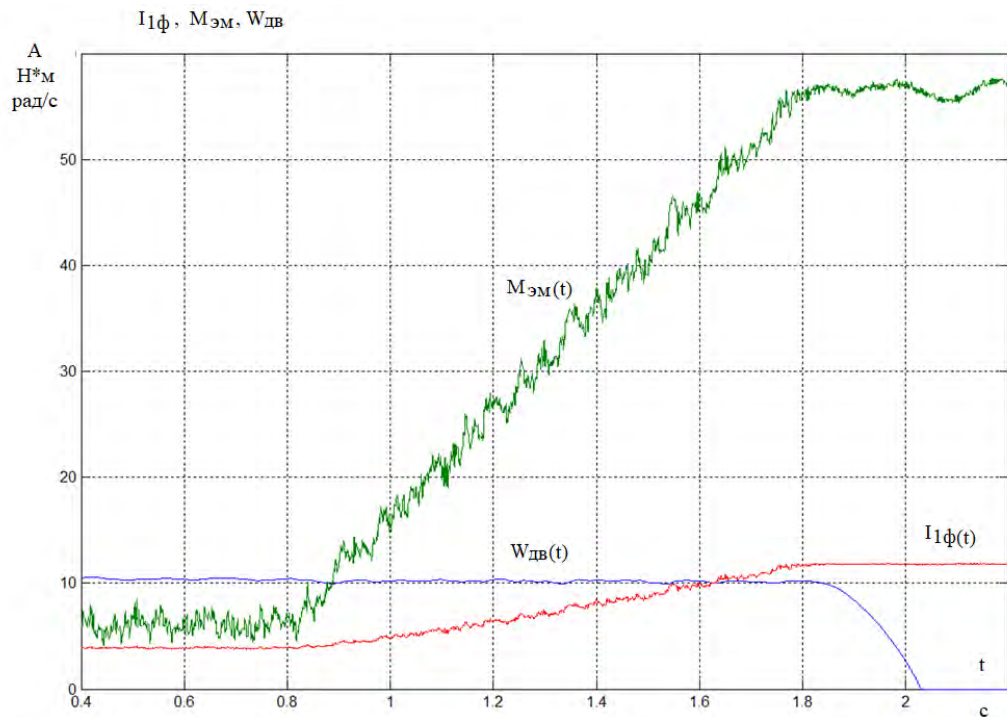


Рисунок 11.2.5 –Работа электропривода с заданной скоростью $\omega_{зад} = 0.1 \cdot \omega_{эл.макс}$ в режиме плавного увеличения момента нагрузки $M_{ср}(t)$

Выводы к разделу 11

1. Имитационная модель бездатчикового электропривода работоспособна, предложенная методика при известных параметрах двигателя позволяет рассчитать параметры и настроить САУ электропривода.
2. Бездатчиковый электропривод может работать только с реактивной нагрузкой, обеспечивает диапазон регулирования скорости до 50, практически целесообразный диапазон регулирования $20 \div 25$, управление следует осуществлять от задатчика интенсивности скорости с S -образной характеристикой.

Раздел 12. Двухзонный асинхронного электропривода с частотным векторным управлением

Для реализации модели двухзонного электропривода с частотным векторным управлением принята структура с датчиком скорости и простым наблюдателем потока двигателя. Реализация блока управления потоком двигателя и его настройка выполнены в соответствии с [21, раздел 5.2.5]. Параметры двигателя, преобразователя, силового канала и системы регулирования электропривода с двигателем RA200L4 приведены в разделе 9. При исследовании двухзонного электропривода приняты следующие параметры электропривода:

$$M_{сР\text{ макс}} = M_{сА\text{ макс}} = 180.48 \text{ Н} \cdot \text{м}; J_{\text{ мех}} = J_{\text{ дв}} = 0.194 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$\omega_{\text{ раб. макс}} = \omega_{\text{ эл. макс}} = 150 \text{ рад/с}$. Параметры настройки задатчика интенсивности скорости с S-образной выходной характеристикой: $T_{\text{ к. зи}} = 0.002 \text{ с}$,

$$t_1 + t_2 + t_3 = 1.6 \text{ с}, \quad t_1 = t_3 = 0.4 \text{ с}, \quad t_2 = 0.8 \text{ с}, \quad \frac{T_{\text{ и1}}}{T_{\text{ к. зи}}} = 200, \quad \frac{T_{\text{ и2}}}{T_{\text{ к. зи}}} = 600, \quad k = 0.5/3.$$

Модель приведена на компакт диске – REP_AD_Baza_dvz_30_1500.

Цель исследований:

1. Проверить предложенный в [21, раздел 5.2.5] принцип управления потоком двигателя и методику выбора параметров управляющего устройства двухзонного электропривода.

12.1. Выбор параметров формирователя потокосцепления ротора

В основу формирователя потокосцепления ротора двигателя двухзонного электропривода положена структурная схема, приведенная в [21, рисунок 74]. Схема формирователя приведена на рисунке 12.1. При задании характеристики функционального преобразователя $\omega^*(M^*)$ использовано полученное в разделе 9 семейство механических характеристик электропривода с разомкнутым контуром скорости (рисунок 9.16), соответствующих напряжениям сети $U_{\text{с макс}} = 418 \text{ В}$, $U_{\text{с н}} = 380 \text{ В}$ и $U_{\text{с мин}} = 323 \text{ В}$.

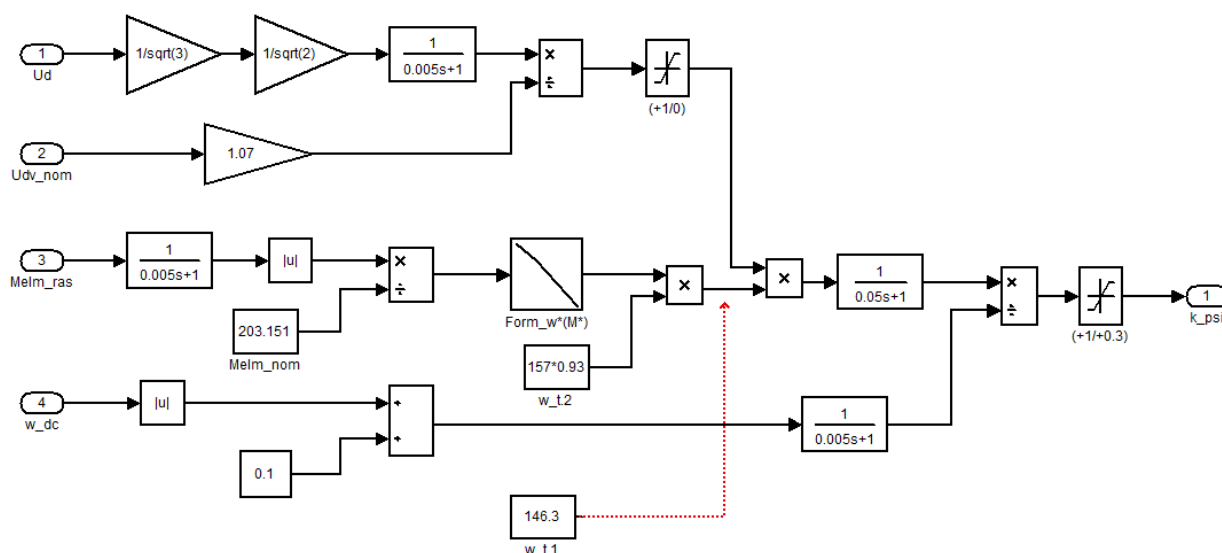
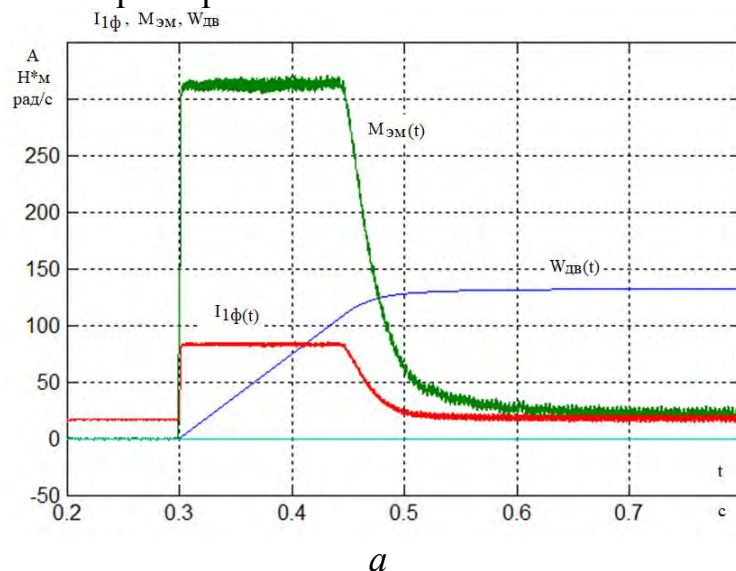
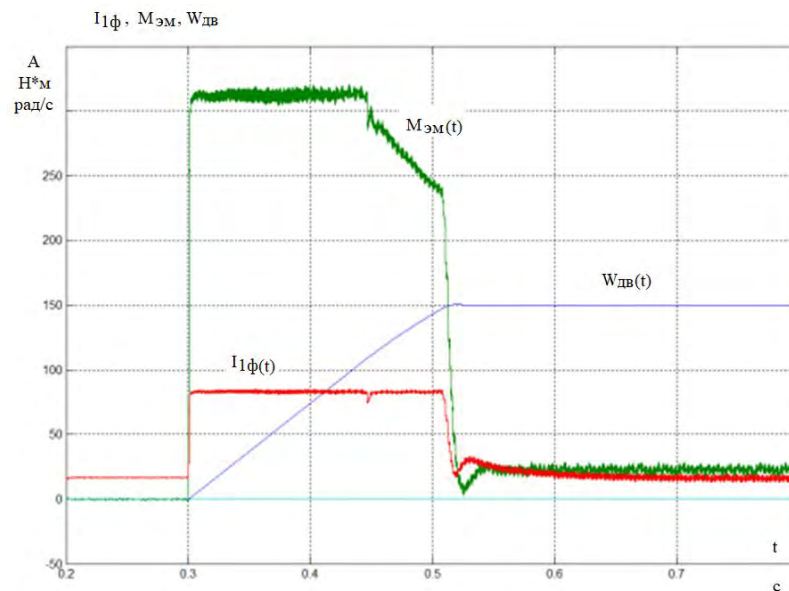


Рисунок 12.1 – Схема формирователя задания потокосцепления ротора

12.2. Исследование электропривода на имитационной модели

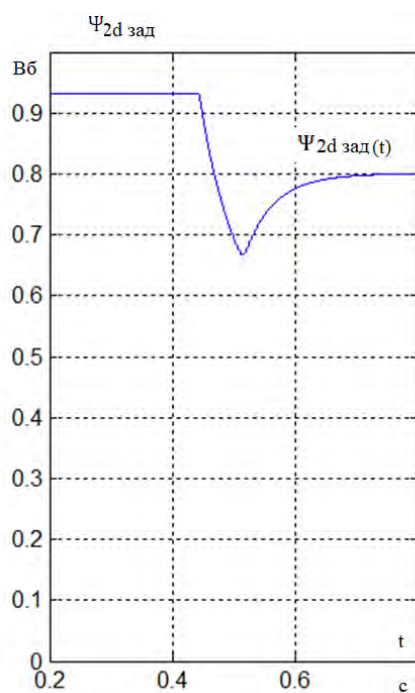
Имитационная модель настроена в полном соответствии с расчетными параметрами. На рисунках 12.2 – 12.8 приведены диаграммы тока $I_{1\phi}(t)$, электромагнитного момента $M_{эм}(t)$, скорости $\omega_{дв}(t)$, заданного $\Psi_{2\text{зад}}(t)$ и фактических значений потокосцеплений ротора $\Psi_{\alpha}(t)$ и $\Psi_{\beta}(t)$ двухфазного двигателя, иллюстрирующие отработку электроприводом значения скорости $\omega_{\text{зад}} = \omega_{\text{эл.макс}} = 150 \text{ рад/с}$ при $U_{\text{с мин}} = 323 \text{ В}$. Диаграммы координат на рисунках 12.2 – 12.6 сняты с аналоговым датчиком скорости ($n_{\text{ацпдс}} = 14$, $T_{\text{к.дс}} = 0.0002 \text{ с}$) и нагрузкой реактивного характера.



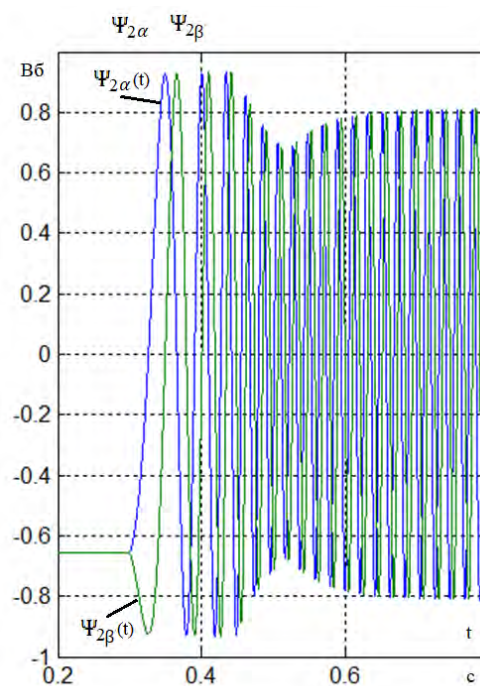


б

Рисунок 12.2 – Обработка электроприводом ступенчатого задания $\omega_{\text{зад}} = 150$ рад/с на холостом ходу: а – однозонным; б – двухзонным



а



б

Рисунок 12.3 – Обработка двухзонным электроприводом ступенчатого задания $\omega_{\text{зад}} = 150$ рад/с на холостом ходу: а – расчетная зависимость $\Psi_{2d \text{ расч}}(t)$; б – фактические диаграммы потокосцеплений $\Psi_{2\alpha}(t)$ и $\Psi_{2\beta}(t)$

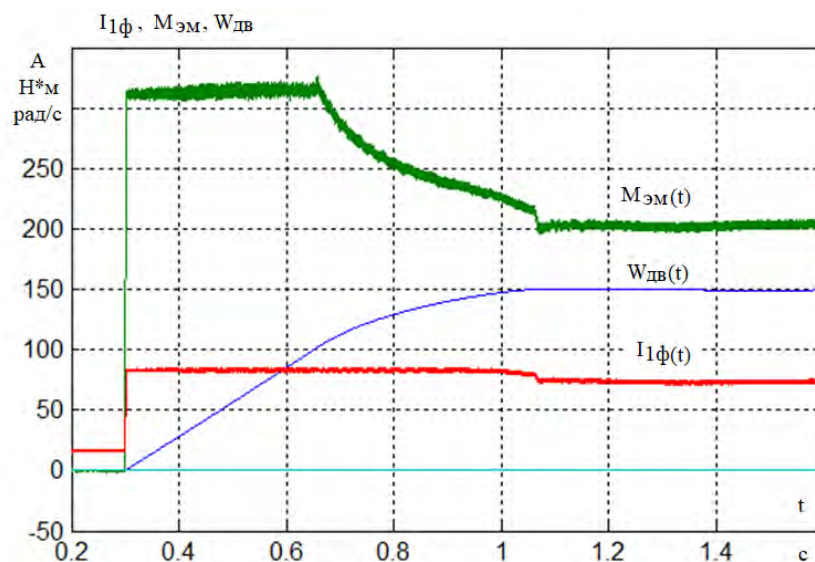


Рисунок 12.4 – Обработка двухзонным электроприводом ступенчатого задания скорости $\omega_{зад} = 150$ рад/с с моментом нагрузки $M_{ср} = M_{дв.н}$

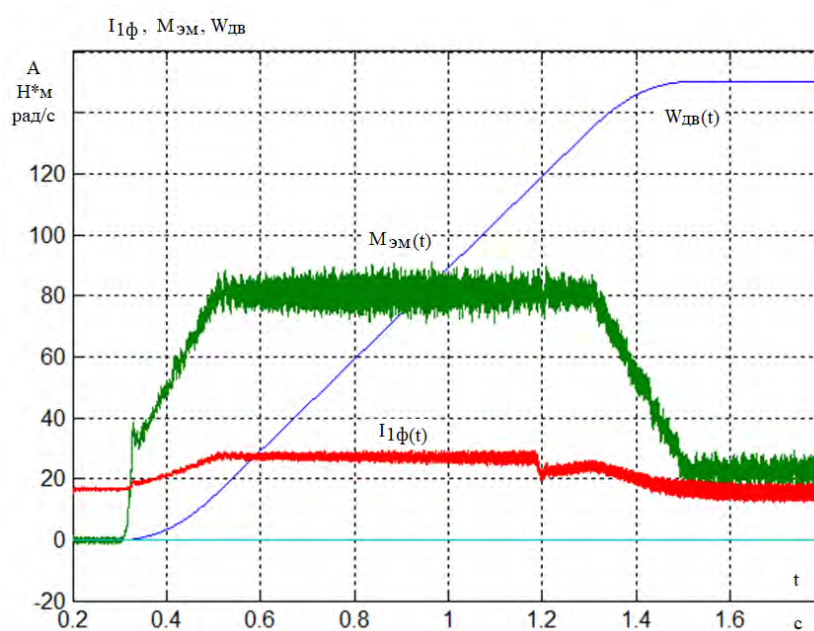


Рисунок 12.5 – Обработка двухзонным электроприводом задания $\omega_{зад} = 150$ рад/с на холостом ходу с управлением от задатчика интенсивности скорости

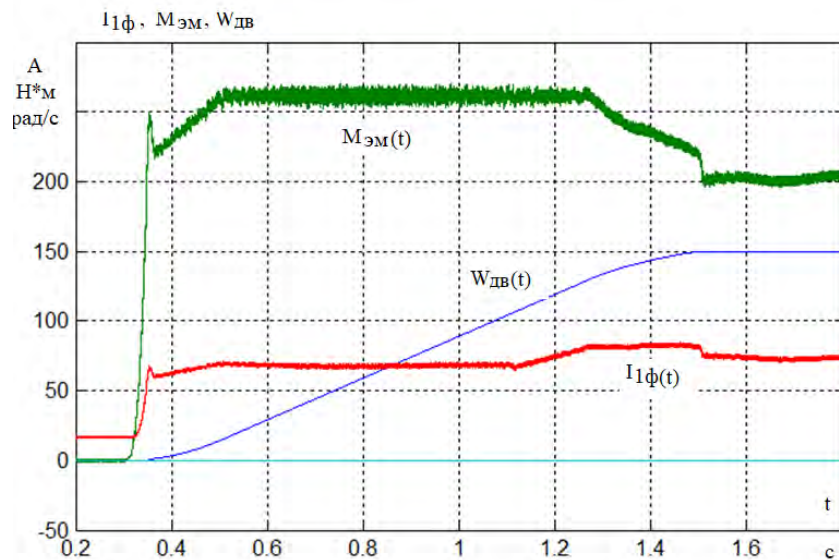


Рисунок 12.6 – Обработка двухзонным электроприводом задания $\omega_{зад} = 150$ рад/с при моменте нагрузки $M_{ср} = M_{дв.н}$ с управлением от задатчика интенсивности скорости

На рисунках 12.7 – 12.8 приведены диаграммы тока, момента и скорости двигателя, а так же напряжения звена постоянного тока $U_d(t)$, снятые с импульсным датчиком скорости ($n_{имп.дс} = 4 \cdot 2500$, $T_{к.дс} = 0.002$ с), нагрузкой активного характера и управлением от задатчика интенсивности скорости.

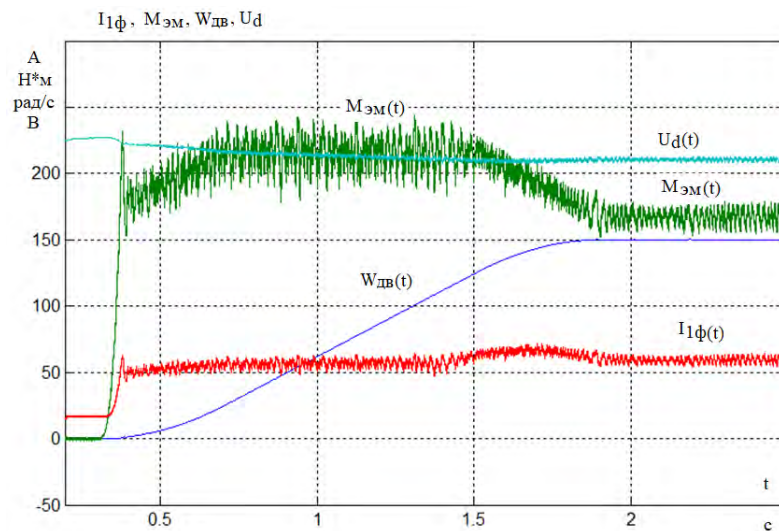


Рисунок 12.7 – Обработка двухзонным электроприводом с импульсным датчиком и моментом нагрузки $M_{сА} = 0.8 \cdot M_{дв.н}$ задания $\omega_{зад} = 150$ рад/с

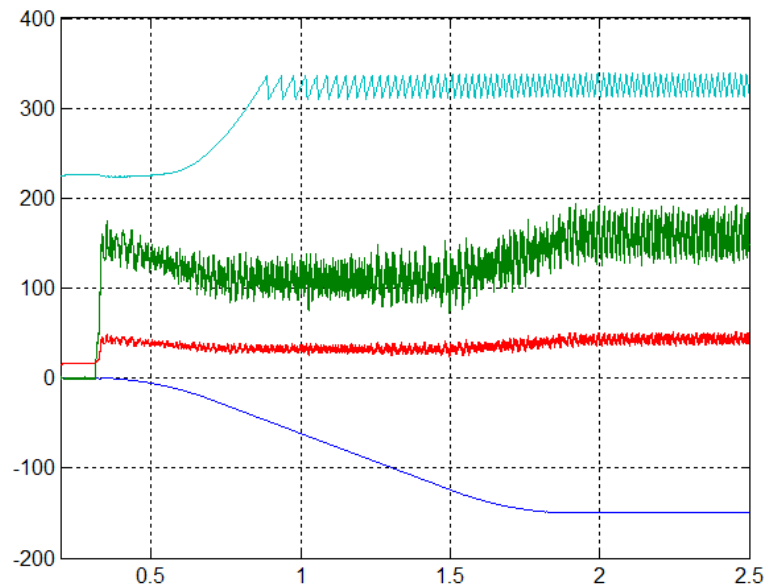


Рисунок 12.8 – Отработка двухзонным электроприводом с импульсным датчиком и моментом нагрузки $M_{сА} = M_{дв.н}$ задания $\omega_{зад} = -150$ рад/с

Выводы к разделу 12

1. Имитационная модель двухзонного электропривода работоспособна, предложенная методика позволяет рассчитать параметры и настроить блок управления потоком двигателя САУ электропривода.
2. Исследования подтверждают эффективность предложенного способа реализации двухзонного регулирования скорости двигателя, которая возрастает с увеличением интервала изменения напряжения питающей сети.

Раздел 13. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Коммерческая ценность разработки, является основополагающей, по сравнению с масштабом открытия, об этом говорит нам современная перспектива научного проекта. Оценка которого осложнена на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного изделия. Одно из главных и необходимых условий при поиске источников финансирования – это эстиматизацию коммерческой ценности проектируемого субъекта. Это является первостепенным для разработчиков, которые должны представлять перспективы и состояние проводимых научных исследований.

Необходимо понимать, что привлекательность коммерческой составляющей научного проекта определяется тем, как быстро разработчик сможет найти ответы на такие вопросы: будет ли изделие востребовано рынком; какой бюджет у научного проекта; какой срок реализации; какая цена и т.д..

Следовательно, цель раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» – обеспечение конкурентоспособности, создание ресурсоэффективных и ресурсосберегающих технологий.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- Инициализация проекта;
- Оценка коммерческого потенциала проекта с помощью технологии QuaD;
- Планирование научно-исследовательских работ;
- Составление сметы затрат на проектирование;
- Оценки ресурсной эффективности продукции.

С учетом решения данных задач была сформирована структура и содержание раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».

Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Модернизация производственных мощностей является очень важная задача в любой промышленности. Технологический процесс производства кокса ни чем не выбивается из общего ряда вещей. Данная модернизация требует особого внимания при проектировке.

Проектируемая система обладает рядом преимуществ по сравнению с изначальной версией, не получившей никакой модернизации на протяжении последний сорока лет. А именно:

- Меньшие габариты;
- Меньший вес, вследствие использования Стали 3 в качестве материалов корпуса;
- Высокий коэффициент мощности;
- Высокий КПД;
- Повышенная прочность.
- Инновационная система master-slave.

В дальнейшем результат проекта может быть использован в качестве типовых решений по модернизации и разработке лебедок на рудниковых, металлургических и коксовывающих предприятиях, таким образом можно говорить, что проект имеет коммерческий потенциал. Потенциальными потребителями результатов этого проекта являются предприятия металлургических и коксовывающих промышленности, расположенные на территории РФ.

Технология QuaD

Технология QuaD (QUality ADvisor) представляет собой гибкий инструмент измерения характеристик, описывающих качество новой разработки и ее перспективность на рынке и позволяющие принимать решение

целесообразности вложения денежных средств в научно-исследовательский проект.

В основе технологии QuaD лежит нахождение средневзвешенной величины следующих групп показателей:

1) Показатели оценки коммерческого потенциала разработки:

- влияние нового продукта на результаты деятельности компании;
- перспективность рынка;
- пригодность для продажи;
- перспективы конструирования и производства;
- финансовая эффективность.
- правовая защищенность и др.

2) Показатели оценки качества разработки:

- динамический диапазон;
- вес;
- ремонтпригодность;
- энергоэффективность;
- долговечность;
- эргономичность;
- унифицированность;
- уровень материалоемкости разработки и др.

Показатели оценки качества и перспективности новой разработки подбираются исходя из выбранного объекта исследования с учетом его технических и экономических особенностей разработки, создания и коммерциализации.

Для упрощения процедуры проведения QuaD оценка проводится в табличной форме (табл. 13.3).

В соответствии с технологией QuaD каждый показатель оценивается экспертным путем по столбальной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 100

Таблица 13.1 Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение (3/4)	Средневзвешенное значение (5x2)x100
1	2	3	4	5	6
Показатели оценки качества разработки					
1. Повышение производительности труда пользователя	0,07	95	100	0,95	6,65
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,12	87	100	0,87	10,44
3. Помехоустойчивость	0,03	90	100	0,9	2,7
4. Энергоэкономичность	0,11	90	100	0,9	9,9
5. Надежность	0,06	97	100	0,97	5,82
6. Уровень шума	0,03	80	100	0,8	2,4
7. Безопасность	0,01	80	100	0,8	2,4
8. Потребность в ресурсах памяти	0,02	75	100	0,75	1,5
9. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,04	85	100	0,85	3,4
10. Простота эксплуатации	0,04	98	100	0,98	3,92
11. Качество интеллектуального интерфейса	0,05	96	100	0,96	4,8
12. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,06	100	100	1	6
Показатели оценки коммерческого потенциала разработки					
1. Конкурентоспособность продукта	0,04	90	100	0,9	3,6
2. Уровень проникновения на рынок	0,04	70	100	0,7	2,8
3. Цена	0,1	65	100	0,65	6,5
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,07	95	100	0,95	6,65
5. Послепродажное обслуживание	0,03	90	100	0,9	2,7
6. Финансирование научной разработки	0,05	78	100	0,78	3,9

7. Срок выхода на рынок	0,03	71	100	0,71	2,13
8. Наличие сертификации разработки	0,04	80	100	0,8	3,2
Итого	1				91,41

Оценка качества и перспективности по технологии QuaD определяется по формуле:

$$P_{cp} = \sum B_i \cdot B_i = 0,07 \cdot 95 + 0,12 \cdot 87 + \dots + 0,04 \cdot 80 = 91,41,$$

где P_{cp} – средневзвешенное значение показателя качества и перспективности научной разработки;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – средневзвешенное значение i -го показателя.

Значение P_{cp} получилось равным 91,41, что говорит о том, что данная разработка является перспективной.

Планирование работ по НТП

Структура работ в рамках проекта

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного проекта;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

Составляем перечень этапов и работ в рамках проведения научного проекта, проводим распределение исполнителей по видам работ. Результат представлен в табл.13.2.

Таблица 13.2. Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель темы
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	3	Описание объекта автоматизации (модернизации)	Инженер
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Разработка структурной (принципиальной) схемы ЭП	Инженер
	6	Расчет параметров двигателя и модели	Инженер
	7	Выбор способа регулирования скорости	Инженер
	8	Расчет предельных характеристик системы «преобразователь–электродвигатель»	Инженер
	9	Разработка математической модели системы АУ ЭП	Инженер
	10	Оптимизация САР электропривода	Инженер
	11	Разработка программы имитационного моделирования	Инженер
Обобщение и оценка результатов	12	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель
Разработка технической документации и проектирование	13	Технико-экономические расчеты	Инженер
	14	Вопросы социальной ответственности проекта	Инженер
	15	Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	Инженер

Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного проекта.

Трудоемкость выполнения научного проекта оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{mini} + 2t_{max i}}{5}, \quad (13.1)$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

t_{mini} – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (13.2)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.

\mathcal{C}_i – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Разработка графика проведения проектирования

При выполнении дипломных работ студенты в основном становятся участниками сравнительно небольших по объему научных тем. Поэтому наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (13.3)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (13.4)$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{ki}

необходимо округлить до целого числа.

Все рассчитанные значения сводим в таблицу (табл. 13.3).

110

Пример расчета (составление и утверждение технического задания):

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{\min} + 2 \cdot t_{\max}}{5} = \frac{3 \cdot 1 + 2 \cdot 2}{5} = 1,4 \approx 2 \text{ чел-дней};$$

$$T_p = \frac{t_{ож}}{Ч} = \frac{2}{1} = 2 \text{ дня};$$

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} = \frac{365}{365 - 116 - 14} = 1,553;$$

$$T_k = T_p \cdot k_{кал} = 2 \cdot 1,553 = 3,106 \approx 4 \text{ дня}.$$

Таблица 13.3. Временные показатели проведения научного проекта

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительнос ть работ в рабочих днях T_{pi}		Длительность работ в календарных днях T_{ki}	
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ожi}$, чел-дни					
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер
Составление и утверждение технического задания	1		2		2		2		4	
Подбор и изучение материалов по теме		5		8		7		7		11
Описание объекта автоматизации (модернизации)		3		4		4		4		7
Календарное планирование работ по теме	3		5		4		4		7	
Разработка структурной (принципиальной) схемы ЭП		4		9		6		6		10
Расчет параметров двигателя и модели		4		6		5		5		8
Выбор способа регулирования скорости		2		4		8		8		12

Расчет предельных характеристик системы «преобразователь–электродвигатель»		2		4		3		3		5
Разработка математической модели системы АУ ЭП	3		6		5		5		8	

Оптимизация САР электропривода		4		8		6		6		10
Разработка программы имитационного моделирования		5		8		7		7		11
Оценка эффективности полученных результатов	2		3		3		3		5	
Технико-экономические расчеты		3		7		5		5		8
Вопросы безопасности и экологичности проекта		3		7		5		5		8
Составление пояснительной записки		1		3		2		2		4

На основе табл. 13.3 строим календарный план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования. При этом работы на графике выделяем различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Таблица 13.4. Календарный план-график (Диаграмма Ганта)

№ ра бо т	Вид работ	Исполн ители	T _{кi} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ													
				фев.		март			апрель			май			июнь		
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	4														
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	11														
3	Описание объекта автоматизации (модернизации)	Инженер	7														
4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель	7														
5	Разработка структурной (принципиальной) схемы ЭП	Инженер	10														
6	Расчет параметров двигателя и модели	Инженер	8														

[illegible]

Смета затрат на проектирование

В проектировании данного электродвигателя принимали участие три инженерных работника: научный руководитель и два инженера. Распределение работы между работниками, проектирующими сводим, в таблицу 13.5

Таблица 13.5 План разработки выполнения этапов проекта

№ п/п	Перечень выполняемых работ	Исполнители		Разряд	Продолж. (дней)
		Кол-во	Должность		
1	Получение тех. задания на разработку проекта	3	научный руководитель инженер инженер	15 9 10	1
2	Сбор исходных данных	1	инженер	10	4
3	Ознакомление с технической документацией	1	инженер	10	4
4	Электромагнитный расчет двигателя	1	инженер	10	5
5	Расчет и выбор блока добавочных сопротивлений двигателя	1	инженер	10	2
6	Расчет технологической части проекта	1	инженер	10	2
7	Проверка выполненных расчётов	2	научный руководитель инженер	15 10	1
8	Выполнение чертежей, схем	2	инженер инженер	9 10	3
9	Технико-экономическое обоснование выбора оборудования	1	инженер	10	4
10	Разработка раздела БЖД	1	инженер	10	4
11	Оформление пояснительной записки	1	инженер	10	2
12	Проверка пояснительной записки и чертежей	1	научный руководитель, инженер	15 10	1
Длительность работы, дней: инженер Юр					33
Длительность работы, дней: инженер 9р					4
Длительность работы, дней: научный руководитель 15р					3

Смета затрат на подготовку проекта

Суммарные издержки на проектирование определяем по выражению:

$$\Sigma I_{\text{проекта}} = I_{\text{з.пл}} + I_{\text{соц}} + I_{\text{мат}} + I_{\text{ам}} + I_{\text{пр}} + I_{\text{накл}}, \quad (13.5)$$

где $I_{\text{з.пл}}$ - издержки на заработную плату;
 $I_{\text{соц}}$ – издержки на социальные отчисления;
 $I_{\text{мат}}$ – материальные издержки;
 $I_{\text{ам}}$ – амортизационные издержки;
 $I_{\text{пр}}$ – прочие издержки;
 $I_{\text{накл}}$ – накладные расходы.

Издержки на заработную плату

Таблица 13.6 Единая тарифная сетка с учетом занимаемой должности

Должность	Оклад	Доплата	Коэффициент за отпуск	Районный коэффициент	Итоговая зарплата за месяц	Средняя зарплата за 1 день один руб.	Количество дней работы над проектом	ФЗП
Научный руководитель, 15р	23300	220 0	1,1	1,3	36465	1736	3	5168
Инженер 10р	14500		1,1	1,3	20735	987	33	32586
Инженер, 9р	14500		1,1	1,3	20735	987	4	3948
Итого					68282		40	41702

$$I_{\text{з.пл}} = \frac{(3 \cdot k_1 + Д) \cdot k_2}{21} \cdot X \quad \text{или} \quad I_{\text{з.пл}} = \frac{(3 \cdot k_1 \cdot k_2)}{21} \cdot X, \quad (13.6)$$

где 3 – оклад;

Д – доплата за интенсивность труда;

k_1 – коэффициент за отпуск (1,1);

k_2 – районный коэффициент (1,3);

21 – количество рабочих дней в месяце;

X - количество рабочих дней затраченных на проект (3 дня).

Зарплата.

Расчет для научного руководителя 15 разряда:

$$I_{з.нл} = \frac{(3 \cdot k_1 + D) \cdot k_2}{21} \cdot X = \frac{(23300 \cdot 1,1 + 2200) \cdot 1,3}{21} \cdot 3 = 5168 \text{ (руб.)}.$$

Расчет для инженера 9 разряда:

$$I_{з.нл} = \frac{(3 \cdot k_1 \cdot k_2)}{21} \cdot X = \frac{(14500 \cdot 1,1 \cdot 1,3)}{21} \cdot 4 = 3948 \text{ (руб.)}.$$

Расчет для инженера 10 разряда:

$$I_{з.нл} = \frac{(3 \cdot k_1 \cdot k_2)}{21} \cdot X = \frac{(14500 \cdot 1,1 \cdot 1,3)}{21} \cdot 33 = 32587 \text{ (руб.)}.$$

Тогда:

$$I_{з.нл\Sigma} = \Sigma I_{з.нл} = 5168 + 3948 + 32587 = 41702 \text{ (руб.)}.$$

Отчисления на социальные нужды

В статью расходов «отчисления на социальные нужды» закладывается обязательные отчисления по установленным законодательством нормам. Органам государственного социального страхования, пенсионного фонда, государственного фонда занятости и медицинского страхования, от элемента «затраты на оплату труда». Размер отчислений на социальные нужды составляет 30% от ФЗП.

$$I_{соц} = 0,3 \cdot I_{з.нл\Sigma} = 0,3 \cdot 41702 = 12510 \text{ (руб.)}. \quad (13.7)$$

Материальные затраты на канцелярские товары Материальные затраты на канцелярские товары примем в размере 1000 руб. (в условиях цен на канцелярские товары в настоящее время).

$$I_{mat} = 1000 \text{ (руб.)}.$$

Амортизация вычислительной техники

Основной объем работ по разработке проекта был выполнен на персональном компьютере первоначальной стоимостью 34 тысячи рублей. Произведём расчёт амортизации стоимости ПК.

$$I_{ам} = \frac{T_u}{T_{кал}} \cdot \Phi_{кт} \cdot H_{\phi} = \frac{30}{365} \cdot 34000 \cdot \frac{1}{5} = 557,38 \text{ (руб.)}, \quad (13.8)$$

где T_u – количество отработанных дней на ПК;

$T_{кал}$ – количество календарных дней в году;

$\Phi_{кт}$ – первоначальная стоимость ПК;

$$H_{\phi} = \frac{1}{T_{сл}} \text{ – срок полной амортизации.} \quad (13.9)$$

Прочие неучтенные затраты

Прочие неучтенные прямые затраты включают в себя все расходы связанные с налоговыми сборами (не предусмотренными в предыдущих статьях), отчисления внебюджетные фонды, платежи по страхованию, оплата услуг связи, представительские расходы, затраты на ремонт и прочее. Принимаем размер прочих затрат как 10% от суммы расходов на материальные затраты, услуги сторонних организаций, амортизации оборудования, затрат на оплату труда, отчисления на социальные нужды.

$$\begin{aligned} I_{пр} &= 0,1 \cdot (I_{з.пл} + I_{соц} + I_{мат} + I_{ам}) = \\ &= 0,1 \cdot (41702 + 12510 + 1000 + 557) = 5577 \end{aligned} \quad (13.10)$$

Накладные расходы

Накладные расходы составят 200% от ФЗП. Включают в себя затраты на хозяйственное обслуживание помещения, обеспечение нормальных условий труда, оплату за энергоносители и другие косвенные затраты

$$I_{накл} = 2 \cdot I_{з.пл\Sigma} = 2 \cdot 41702 = 83404 \text{ (руб.)}. \quad (13.1)$$

Раздел 14. Социальная ответственность

Безопасность жизнедеятельности представляет собой систему законодательных актов и соответствующих им социально-экономических, технических, гигиенических, организационных мероприятий, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда.

Техника безопасности представляет собой систему организационных технических мероприятий и средств, предотвращающих воздействие опасных производственных факторов, которые приводят к несчастным случаям на производстве. Производственная санитария представляет собой систему организационных, гигиенических и санитарно-технических мероприятий и средств, предотвращающих воздействие вредных производственных факторов, которые приводят к профессиональному заболеванию.

В данном разделе мы рассмотрим вопросы технологического процесса сборки асинхронного тягового двигателя. Для осуществления этого технологического процесса применяется следующее оборудование: транспортная система, ручные инструменты. Технологический процесс сборки включает в себя следующие виды работ: продувку деталей, работу с транспортными приспособлениями.

Анализ опасных и вредных факторов

На рассматриваемом участке при сборке происходит образование пыли и других вредных факторов, согласно заводской лаборатории.

Таблица 14.1 Концентрация вредных веществ

Вещества	ПДК, мг/м	Класс опасности	Агрегатное состояние
СО	20	4	Газ
Пыль свинцовая	4	2	Аэрозоль
Пыль	6	4	аэрозоль

Периодический контроль содержания в воздухе рабочей зоны вредных веществ осуществляется силами заводской лаборатории или санитарно-гигиенической станции.

При сборке электрических двигателей возникает ряд вредных и опасных производственных факторов.

Опасные факторы возникающие при данном технологическом процессе:

- Поражение электрическим током, при работе испытательной станции.
- Получение механических травм, при слесарно-сборочных работах. (возможность падения с высоты различных деталей и предметов, оборудование работающее под давлением выше атмосферного, пневмоинструмент, глазной травматизм, стружка).
- Пожар (наличие открытого огня при проведении сварочных и других работ, короткое замыкание и другие причины)

Наряду с опасными факторами можно выделить вредные факторы, которые приводят к нарушению нормального режима работы. К вредным факторам относятся:

- Отклонение параметров микроклимата на участке общей сборки асинхронного двигателя от установленных норм.
- Шум, при работе с ручным механизированным инструментом.
- Вибрация, при работе с ручным механизированным инструментом.
- Недостаточная освещенность рабочей зоны

Контролем содержания вредных примесей в воздухе и на рабочих местах занимается санитарная лаборатория.

С учётом предельно - допустимых концентраций вредных веществ, эти участки выполняются с вытяжной вентиляцией.

Производственная санитария

В результате гигиенических исследований установлено, что шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывая вредное воздействие на организм человека.

При длительном воздействии шума на организм человека происходят нежелательные явления:

- снижается острота зрения, слуха;
- повышается кровяное давление;
- снижается внимание.

Сильно продолжительный шум может быть причиной функциональных изменений сердечно сосудистой и нервной систем. Измерение шума проводят с целью оценки его на рабочих местах или рабочих зонах для сопоставления с требованиями санитарных норм, а также для оценки шумовых характеристик машин и оборудования, с целью разработки мероприятий по борьбе с шумом. Для оценки шума используют частотный спектр измеренного уровня звукового давления, выраженного в децибелах в активных полосах частот, который сравнивают с предельным спектром.

В цехе на сборочном участке используются вещества, которые оказывают вредное влияние на организм человека. Санитарными нормами установлены предельно - допустимые концентрации вредных примесей в воздухе. Одно из веществ - хромовый ангидрид, его ПДК = 0.01 мг/м^3 , класс опасности - 1; марганец, его ПДК = 0.1 мг/м^3 , класс опасности 2. Также при сборке применяется сварка что влечет за собой образование таких веществ как СО, его ПДК = 20 мг/м^3 , класс опасности 4; Пыль сварочная аэрозоль, её ПДК = 4 мг/м^3 , класс опасности 2. Также образуется пыль, её ПДК = 6.0 мг/м^3 , класс опасности 4. Для их удаления применяют вытяжную вентиляцию, для снижения выбросов этих веществ в атмосферу применяют фильтры.

Расчет искусственного освещения

Верно спроектированное и выполненное освещение на предприятиях машиностроительной индустрии, гарантирует возможность нормальной производственной работы.

Задачи расчета искусственного освещения, считается определение количества осветительных приборов, их типа, мощности источников света.

Выбор осветительных приборов

- люминесцентные лампы - открытые двухламповые светильники типа ОД, ОДОР, ОДО, ШОД, ООД - для нормальных помещений с хорошим отражением стен и потолка; их применение допускается при умеренной влажности и запыленности
- Светильники ПВЛ - являются пылевлагозащищёнными, пригодны для некоторых пожароопасных помещений. Мощность лампы 2x40 Вт и 2x80 ВТ

Выбор коэффициента запаса

Полученная из таблиц величина освещенности корректируется с учетом коэффициента запаса, так как со временем за счет загрязнения светильников и уменьшения светового потока лампы освещённость снижается

Таблица 14.2 Значение коэффициента запаса

Характеристика объекта	Люминесцентные лампы	Лампы накаливания
Помещения с большим выделением пыли	2.0	1.7
Помещения со средним выделением пыли	1.8	1.5
Помещения с малым выделением пыли	1.5	1.3

Размещение осветительных приборов

При выборе расположения светильников необходимо руководствоваться двумя критериями:

1. обеспечение высокого качества освещения, ограничение ослеплённости и необходимой направленности света на рабочие места
2. наиболее экономичное создание нормированной освещенности

Как показали исследования, в зависимости от типа светильников

существует наивыгоднейшее расстояние между светильниками: $\lambda = \frac{L}{h}$, где

L - расстояние между светильниками;

h - высота подвеса светильника над рабочей поверхностью.

Для люминесцентных светильников $\lambda = 1 - 1.3$.

Расстояние от стен помещения до крайних светильников рекомендуется брать $0,3L-0,5L$.

Выбираем светильник ПВЛ, $\lambda = 1.1$ размеры помещения $a=15$ м, $b=10$ м, ширина между рядами светильников $L_{CB} = \lambda \cdot h = 1,1 \cdot 5 = 5,5$ м предварительно которое потом будет уточнено.

Количество светильников в одном ряду:

По длине:

$$n_{CB.ДЛ} = \frac{A - L_{CB}}{L_{CB}} + 1 = \frac{15 - 5,5}{5,5} + 1 = 3 \quad (14.1)$$

По ширине:

$$n_{CB.Ш} = \frac{B - L_{CB}}{L_{CB}} + 1 = \frac{10 - 5,5}{5,5} + 1 = 2 \quad (14.2)$$

общее число светильников в помещении:

$$n_{CB} = n_{CB.ДЛ} \cdot n_{CB.Ш} = 3 \cdot 2 = 6 \quad (14.3)$$

Расстояние между светильниками примем окончательно 4,5м в длину и 6м в ширину см. на рис 14.1

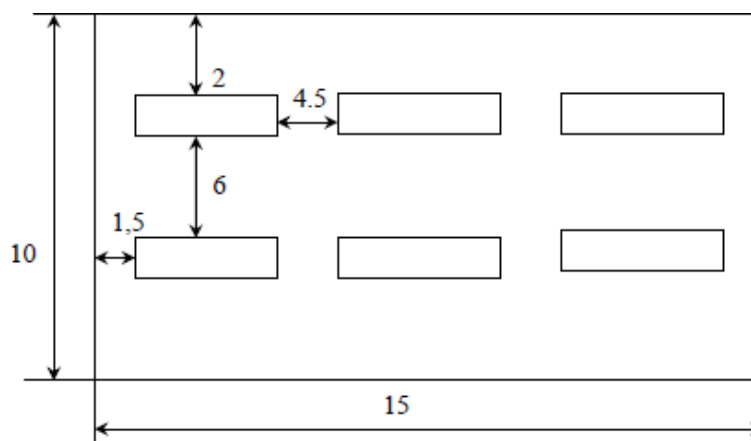


Рис.14.1. План расположения светильников

Расчет осветительной установки

Принципиальной задачей на производстве, считается создание лучших условий для видения. Данную задачу можно решить лишь осветительной системой. В данных нормах рекомендуется освещённость участков, содержащих необходимое оборудование, должна быть более 200 лм.

Расчет делается способом коэффициента применения. Применяя данный способ можно найти световой поток лампы, нужный для создания заданной освещенности горизонтальной плоскости с учетом света, отражённого стёклами и потолками. Способ коэффициента использования применяется только при расчете общего равномерного освещения.

Величина светового потока лампы:

$$F = \frac{E \cdot k \cdot S \cdot Z}{N \cdot \eta} \quad \text{, где} \quad \text{_____} \quad (14.4)$$

E - минимальная освещённость, лк;

k - коэффициент запаса;

S - площадь помещения, м2;

N - число ламп освещения;

η - коэффициент использования светового потока;

Z - коэффициент неравномерности освещения.

Коэффициент использования светового потока:

η - отношение полного светового потока, достигающего освещаемой поверхности, к полному световому потоку в помещении.

Индекс помещения:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)} = \frac{150}{4 \cdot (15 + 10)} = 1,5 \quad (14.5)$$

коэффициенты отражения:

$f_{\text{п.}} = 50\%$ - состояние потолка (чистый бетонный),

$p_0 = 30\%$ - состояние стен (бетонный с окнами).

Коэффициент неравномерности Z введен в формулу светового потока, потому что освещенность, подсчитанная без этого коэффициента, является не минимальной, как требуют нормы, а средней. Введением коэффициента Z это несоответствие устраняется. Для люминесцентных ламп $Z = 0,9$ $E = 200$ лм - минимальная нормативная освещённость, для разряда зрительных работ средней точности (табл.5.4).

$\eta = 0,5$ - для ламп типа ПВЛ:

$$F = \frac{200 \cdot 1,8 \cdot 150 \cdot 0,9}{2 \cdot 6 \cdot 0,5} = 8100 \text{ лм} \quad (14.6)$$

Принимаем в каждом светильнике типа ПВЛ два источника света мощностью по 80 Вт (со световым потоком 4500 лм), которые соответствует отклонениям (-10%, +20%)

Микроклимат

Большое значение для охраны здоровья и труда человека имеет качество воздуха в производственных помещениях, в частности в рабочих зонах. Рабочей зоной называется пространство, высотой до 2-х метров над уровнем пола или

площадки на которых находятся места постоянного или временного пребывания работающих (более 2-х часов непрерывно).

Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений СанПиН 2.2.4.548-96.

Эти требования устанавливают оптимальные и допустимые метеорологические условия для рабочей зоны помещения, нормируемые следующими параметрами: температура, оптимальная влажность, скорость движения воздушного потока. Работа относится к средней тяжести - Па
Значения перечисленных параметров непосредственно к проектируемому участку приведены в табл. 14.3, согласно СанПиН 2.2.4.548-96

Таблице 14.3 Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Параметр	Сезон года	
	Холодный	Тёплый
Температура воздуха, °С	19-21	20-22
Температура поверхностей, °С	18-22	19-23
Относительная влажность, %	60-40	60-40
Скорость движения воздуха, м/с	0,2	0,2

В данном случае это условие выполняется, так как проектируемый участок разработан на базе действующего, где заводская комиссия в своё время проводила замеры искусственного освещения и заключила что оно соответствует норме.

Шум на производстве - это ещё одна проблема, которая наносит большой экономический и социальный ущерб. Шум неблагоприятно воздействует на организм человека, технические и физиологические нарушения, снижает работоспособность и создаёт предпосылки для общих профессиональных заболеваний и производственного травматизма.

Необходимые условия для снижения шума:

Всё оборудование, применяемое на участке сборки, для снижения шума установлено на виброопорах.

На данном участке, при выполнении мероприятий по сокращению проникновения шумов на улицу, световые проёмы целесообразно закладывать стеклоблоками. Вредным производственным фактором является вибрация - механические колебания твёрдых тел, передаваемые организму человека. Они могут быть причиной расстройства сердечно-сосудистой и нервной системы, а так же опорно-двигательной системы человека. Измерение вибрации производится прибором ВШВ-003, снабженным датчиком вибрации..

Нормирование теплового инфракрасного излучения. Нормирование теплового излучения в производственных условиях регламентируется в соответствии с требованиями стандарта ГОСТ 12.1.005-88. "Воздух рабочей зоны. Общие санитарно-гигиенические требования в области рабочей зоны" и Санитарных правил и норм СанПиН 2.2.4.548-96 "Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений".

Нормирование ИК-излучения осуществляется по интенсивности допустимых интегральных потоков излучения с учетом спектрального состава, размера облучаемой площади, защитных свойств спецодежды для продолжительности действия более 50% смены. Интегральная допустимая интенсивность теплового облучения не должна превышать $258 \text{ Вт/м}^2 [(2,1 \text{ Дж}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин.}))]$.

Для оценки сочетанного воздействия параметров микроклимата в целях осуществления мероприятий по защите работающих от возможного перегревания рекомендуется использовать интегральный показатель тепловой нагрузки среды.

Тепловая нагрузка среды (ТНС) - сочетанное действие на организм человека параметров микроклимата (температура, влажность, скорость движения воздуха, тепловое облучение), выраженное одночисловым показателем в

градусах Цельсия. Значения ТНС-индекса не должны выходить за пределы величин, рекомендуемых согласно СанПиН 2.2.4.548-96

Допустимые величины интенсивности теплового облучения работающих от источников излучения, нагретых до белого и красного свечения (раскаленный или расплавленный металл, стекло, пламя и др.), не должны превышать 140 Вт/м². При этом облучению не должно подвергаться более 25% поверхности тела и обязательным является использование средств индивидуальной защиты, в том числе средств защиты лица и глаз.

По Санитарным правилам и нормам СанПиН 2.2.4.548-96 температура наружных поверхностей технологического оборудования и ограждений на рабочем месте не должна превышать 45 °С.

Техника безопасности

Цех относится к помещениям с повышенной опасностью поражением людей электрическим током, характеризуется наличием следующих условий согласно ПУЭ 1.1.13:

- токопроводящая пыль;
- токопроводящие полы (металлические, земляные, железобетонные, кирпичные);
- возможность одновременного прикосновения человека к имеющим со- единения с землёй металлоконструкциям зданий, механизмов, с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования – с другой.

1. К самостоятельной работе допускаются лица прошедшие медицинское освидетельствование, курсовое обучения по теоретическим знаниям и практическим навыкам в работе в объёме программы, аттестацию квалификационной комиссии и инструктаж по охране труда на рабочем месте.

2. Первичный инструктаж рабочий получает на рабочем месте до начала производственной деятельности. Первичный инструктаж производит мастер цеха. Повторный инструктаж рабочий получает - ежеквартально.

3. После первичного инструктажа в течение первых двух – пяти смен должны выполнять работу под наблюдением мастера, либо наставника, после чего оформляется допуск к самостоятельной работе, который фиксируется датой и подписью инструктирующего и инструктируемого в журнале инструктажа.

4. Рабочий должен работать в спецодежде:

- Костюм ХБ ГОСТ 27575-87 ;
- Перчатки ХБ вязанные ГОСТ 5007-87 ;
- Ботинки кожаные с металлическим носком ГОСТ 28807-90 ;
- Рукавицы комбинированные ГОСТ 124010-75.

5. Защита от электростатического электричества осуществляется:

- уменьшение генерации электрических зарядов;
- устранение уже образовавшихся зарядов (защитное заземление);
- нейтрализаторы статического электричества;
- увлажнение воздуха;
- средства индивидуальной защиты: обувь на кожаной подошве или подошве из электропроводной резины;

Опасным производственным фактором (ОПФ) называется такой производственный фактор, воздействие которого на

работающего в определенных условиях приводит к травме или к другому внезапному резкому ухудшению здоровья.

К опасным производственным факторам следует отнести

- электрический ток определенной силы;
- раскаленные тела;
- возможность падения с высоты самого работающего либо различных де-талей и предметов;
- оборудование, работающее под давлением выше атмосферного, и т.д;

Основные мероприятия по предотвращению травматизма предусмотрены: в системе нормативно-технической документации по безопасности труда [ПОТ Р М-016-2001]; в организации обучения и обеспечения работаю-щих безопасными средствами защиты; в прогнозировании производственно-го травматизма; рациональном планировании средств и определении экономической эффективности от запланированных мероприятий.

Все мероприятия по предотвращению производственного травматизма можно разделить на организационные и технические.

Организационные мероприятия, способствующие предотвращению травматизма: качественное проведение инструктажа и обучение, привлечение их к работе по специальности, осуществление постоянного руководства и надзора за работой, обеспечение рабочих спецодеждой, личными средствами защиты, выполнение правил эксплуатации оборудования.

К техническим способам обеспечения безопасности протекания тех- нических процессов и работы оборудования

относятся механизация и автоматизация технологических процессов, дистанционное наблюдение и управление, надежность и прочность оборудования, особые средства тех. безопасности (ограждение, заземление, герметизация, экранирование и т. п.).

В частности основными мероприятиями для защиты от глазного травматизма считаются установка щитков на станках, ношение корректирующих очков, также приспособление при работах, требующих большой точности, оптимального местного освещения на станках.

Механизация — эффективное средство по предотвращению несчастных случаев, облегчению физического труда.

Пожарная безопасность

Причинами возникновения пожаров могут быть нарушение технологических процессов и неисправность оборудования, в частности несвоевременный ремонт оборудования, нарушение технологических инструкций, введение в технологию производства материалов без учета их пожароопасных свойств, образование значительных электростатических зарядов. Пожары возможны в результате нарушения правил технической эксплуатации электроустановок, например перегрузок электрических сетей и коротких замыканий в них, недопустимых сопротивлений в местах соединения и контактов проводников, искрения, применения электрооборудования не соответствующего классу пожарной зоны.

Участок общей сборки асинхронного двигателя согласно НПБ105-03. относится к категории «В», т.е. это участок, где может гореть эл. изоляция, материалы оформления помещения, мебель, документы и т.д.

Каждый работающий на объединении должен знать

-При обнаружении пожара или загорания вызвать пожарную помощь по телефону и принять меры у ликвидации очага пожара или действовать по указанию старшего начальника или начальника ДПД.

- Знать пути эвакуации из помещения.

- Знать пожароопасность своего цеха, участка и при обнаружении на-рушений противопожарного характера устранить их или сообщить на-чальнику цеха.

- Знать и уметь пользоваться первичными средствами пожаротушения. На данном участке для тушения очагов пожара применяются:

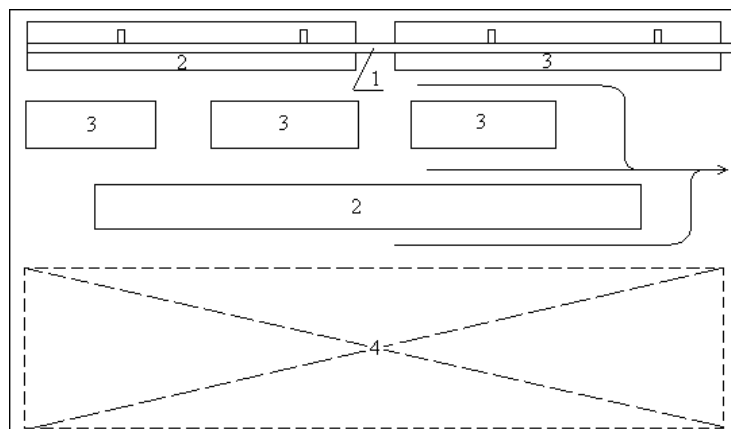
- Огнетушители типа ОП-5, ОП-2, ОУ-2, ОУ-5, ОУ-8;

- Стационарная пенная установка;

- Пожарные гидранты с пожарными рукавами. Огнетушители ОП-5, ОП-2 - порошковые, предназначены для тушения загорания установок под напряжением до 1000В.

Огнетушитель ОУ-2, ОУ-5, ОУ-8 - углекислотные, применяются для тушения электрооборудования под напряжением до 1000 В. и др. предметов.

Стационарная пенная установка - предназначена для тушения загорания различных веществ, за исключением щелочных и щелочноземельных веществ. Пожарный гидрант – труба, по которой подается вода с разъемом для подключения пожарного рукава. Водой можно тушить очаги пожара за исключением



электроустановок под напряжением, ГСМ и химических очагов.

Рис. 14.2 - План эвакуации

1 – монорельс; 2 – верстак для сборки двигателей; 3 – верстак для ком- плектации роторов; 4 – места складирования деталей и заготовок

Охрана окружающей среды

Защита окружающей среды - это комплексная проблема, требующая усилия учёных многих специальностей. Наиболее активной формой защиты окружающей среды от вредного воздействия выбросов промышленных предприятий, является полный переход к безотходным и малоотходным технологиям и производствам. Это требует решения целого комплекса сложных технологических и конструктивных задач.

Важными направлениями следует считать совершенствование технологических процессов и разработку нового оборудования с меньшим уровнем выбросов в окружающую среду, замену и по возможности широкое применение дополнительных методов и средств защиты окружающей среды.

При обращении с твердыми отходами: бытовой мусор (отходы бумаги, обрезки кабелей, пищевые отходы); отработанные люминесцентные лампы; офисная техника, комплектующие и запчасти, утратившие в результате износа потребительские свойства – надлежит руководствоваться Постановлением Администрации г. Томска от 11.11.2009 г.

№1110 (с изменениями от 24.12.2014): бытовой мусор после предварительной сортировки складируют в специальные контейнеры для бытового мусора (специализированные службы вывозят мусор на городскую свалку); утратившее потребительские свойства офисное оборудование передают специальным службам для сортировки или складирования на городских мусорных полигонах.

Вследствие использования работниками душевых и туалетов образуются жидкие отходы для удаления, которых применяют канализационную систему.

Отработанные люминесцентные лампы утилизируются в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 03.09.2010 №681. Люминесцентные лампы, применяемые для искусственного освещения, являются ртутьсодержащими и относятся к 1 классу опасности. Ртуть люминесцентных ламп способна к активной воздушной и водной миграции. Интоксикация возможна только в случае разгерметизации колбы, поэтому основным требованием

экологической безопасности является сохранность целостности отработанных ртутьсодержащих ламп.

Чрезвычайная ситуация

Современное высокоразвитое индустриальное общество требует все большего усложнения технологии производства, что неизбежно ведет к росту возможностей возникновения аварий и катастроф. Каждый год на территории России возникают сотни чрезвычайных ситуаций.

Чрезвычайная ситуация - это обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

Необходимо предупреждение чрезвычайных ситуаций - комплекс мероприятий, проводимых заблаговременно и направленных на максимально возможное уменьшение риска возникновения чрезвычайных ситуаций, а также на сохранение здоровья людей, снижение размеров ущерба окружающей природной среде и материальных потерь в случае их возникновения.

Ликвидация чрезвычайных ситуаций - это аварийно-спасательные и другие неотложные работы, проводимые при возникновении чрезвычайных ситуаций и направленные на

спасение жизни и сохранение здоровья людей, снижение размеров ущерба окружающей природной среде и материальных потерь, а также на локализацию зон чрезвычайных ситуаций, прекращение действия характерных для них опасных факторов.

Под подготовкой объекта к работе в ЧС понимается заблаговременно проводимые организационные, инженерно-технические и специальные мероприятия их работы с учетом риска возникновения чрезвычайных ситуаций.

1. Регион размещения, присущие данной местности опасные стихийные бедствия.

2. Метеорологические особенности региона.

3. Социально-экономическая ситуация.

4. Условия размещения объекта, рельеф местности, характер застройки, насыщенность транспортными коммуникациями, наличие потенциально опасных предприятий радиационного, химического, биологического и взрывоопасного характера.

5. Внутренние условия, влияющие на устойчивость:

- численность работающих, уровень их компетентности и дисциплины;

- размеры и характер объекта, выпускаемая продукция;

- характеристика зданий и сооружений;

- особенности производства, применяемых технологий и материальных веществ;

- потребность в основных видах энергоносителей и воде, наличие своих ТЭЦ;

- количество и суммарная мощность

трансформаторов, мс газораспределительных

станций (пунктов) и системы канализации.

В разделе был проведён анализ вредных и опасных факторов, рассмотрены разделы пожарной безопасности, производственной санитарии, микроклимат и охрана окружающей среды. Произведен расчет освещения цеха. Также были рассмотрены разделы техники безопасности, в которых прописаны действия рабочего в различных чрезвычайных ситуациях.

Заключение

По результатам проведенных в диссертационной работе теоретических исследований и компьютерного моделирования систем регулируемого асинхронного электропривода с частотным векторным управлением можно сделать следующие выводы.

1. Применение типовых четырехконтурных структур систем управления электроприводов с датчиками скорости и простым наблюдателем потока на основе модели ротора двухфазного двигателя в неподвижной системе координат позволяют реализовать асинхронные реверсивные электроприводы однозонного и двухзонного регулирования скорости, обеспечивающие широкий диапазон и работу с нагрузкой как реактивного, так и активного характера.

2. При питании асинхронного электропривода с частотным векторным управлением от промышленной сети напряжением $U_c = 3 \times 380_{-15\%}^{+10\%}$ В полное использование асинхронного электродвигателя с номинальным линейным напряжением 380 В по скорости достигается только при двухзонном регулировании, что требует снижения нагрузки двигателя в зоне работы с ослабленным полем. Для обеспечения максимальной производительности производственного механизма преобразователь и двигатель в этом случае требуется выбирать большего габарита по мощности и скорости. Для полного использования электродвигателя по скорости и моменту питание асинхронного электропривода с частотным векторным управлением следует осуществлять от трехфазной сети с линейным напряжением не менее 420 В.

3. Предельное быстродействие асинхронного электропривода с частотным векторным управлением определяется значением частоты ШИМ инвертора и достигается при обеспечении равенства временного интервала управления ключами инвертора и интервалов расчета управлений в контурах токов, потокосцепления ротора и скорости $T_{к.с} = T_{к.ψ} = T_{к.т} = T_{шим}$ (увеличение быстродействия возможно, если выполнить условие $T_{к.с} = T_{к.ψ} = T_{к.т} = 0.5 \cdot T_{шим}$). Практически быстродействие электропривода определяется дискретностью – квантованием по уровню сигнала датчика скорости.

4. Разработанные базовые модели реверсивных, регулируемых, однозонных и двухзонных электроприводов с датчиком скорости, способных работать с реактивной и активной нагрузкой, а так же реверсивного, регулируемого бездатчикового электропривода для механизмов с реактивной нагрузкой позволяют осуществить

имитационные исследования методом компьютерного моделирования асинхронных электроприводов с частотным векторным управлением общего назначения для типовых промышленных механизмов. Предложенные имитационные модели асинхронных электроприводов работоспособны, характеризуются универсальностью и в максимальной степени обеспечивают достоверность расчетов процессов в аналоговых элементах силовой части электропривода с учетом дискретности управления ключами инвертора и в элементах цифровой системы автоматического управления электропривода, работающих с временными интервалами квантования, равными или кратными периоду ШИМ инвертора.

5. Предложенные в работе дополнения в методику расчета параметров настройки элементов систем управления асинхронных электроприводов с частотным векторным управлением [6.1, 6.2] позволили при известных параметрах двигателя с высокой степенью достоверности рассчитать параметры и настроить модели цифровых систем управления асинхронных электроприводов и предварительно оценить их качественные показатели работы. Основные положения методики сводятся к следующему:

– регуляторы тока имеют постоянную настройку, соответствующую

$$k_{\text{пр}}(U_d) = k_{\text{инв}}(U_d) \cdot k_y(U_d) = \sqrt{2} \cdot U_{\text{иф.доп}} = \text{const},$$

где

$$k_y(U_d) = \frac{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{\text{иф.доп}}}{U_d};$$

– найденные регуляторами токов управления u_{1d} и u_{1q} двухфазным двигателем корректируются

$$u_{1d}^* = u_{1d} \cdot k_y(U_d), \quad u_{1q}^* = u_{1q} \cdot k_y(U_d)$$

и ограничиваются их предельные значения

$$\text{mod } u_{1dq}^* = \sqrt{u_{1d}^{*2} + u_{1q}^{*2}} \leq 1$$

с приоритетным управлением потоком и зависимым управлением моментом:

$$\text{mod } u_{1d}^*_{\text{макс}} = 1 \cdot k_y(U_d) \quad \text{mod } u_{1q}^*_{\text{макс}} = \sqrt{(1 \cdot k_y(U_d))^2 - (u_{1d}^*)^2};$$

– выбор временных интервалов расчета в контурах токов и наблюдателя потокосцепления ротора

$$T_{\text{к.т}} = T_{\text{шим}}, \quad T_{\text{к.набл.}\Psi} = T_{\text{к.т}};$$

– выбор временных интервалов расчета в контуре скорости и потокоосцепления ротора

$$T_{\text{к.с}} = T_{\text{к.}\Psi} = 0.002 - 0.001 \text{ с};$$

– выбор разрядности АЦП аналогового датчика скорости

$$n_{\text{ацп дс}} \geq 12;$$

– выбор временного интервала расчета аналогового датчика скорости

$$T_{\text{к.анал.дс}} = T_{\text{к.набл.}\Psi};$$

– выбор числа импульсов на оборот импульсного датчика скорости

$$n_{\text{имп.дс}} \geq 4 \cdot 2500 \text{ (с учетверением);}$$

– выбор временного интервала расчета импульсного датчика скорости

$$T_{\text{к.имп.дс}} = T_{\text{к.с}},$$

а для наблюдателя потока использовать экстраполированное значение датчика скорости, например линейную экстраполяцию

$$N_{\omega \text{набл.}\Psi} = N_{\omega i} + \frac{N_{\omega i} - N_{\omega i-1}}{2} + \sum_1^k \frac{T_{\text{к.набл}\Psi}}{T_{\text{к.дс}}} \cdot \frac{N_{\omega i} - N_{\omega i-1}}{2}, \text{ где}$$

$$k = \frac{T_{\text{к.дс}}}{T_{\text{к.набл}\Psi}}.$$

Список литературы

Яуре А.Г., Певзнер Е.М. Крановый электропривод: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 344 с.

1. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.

2. Белов М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: Учебник для вузов / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. Рассудов. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 576 с.

3. Ключев В.И., Терехов В.М. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов: Учебник для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 360 с.

4. Лебедев Е.Д., Неймарк В.К., Пистрак М.Я., Слежановский О.В. Управление вентильными электроприводами постоянного тока. М.: Энергия, 1970. – 200 с.

5. Фишбейн В.Г. Расчет систем подчиненного регулирования вентильного электропривода постоянного тока. М.: Энергия, 1972. – 136 с.

6. Ключев В. И. Ограничение динамических нагрузок электропривода. – М.: Энергия, 1971. – 320 с.

7. Егоров В. Н., Шестаков В. М. Динамика систем электропривода. – Л.: Энергоатоммаш: Ленингр. отд-ние, 1983. – 216 с.

8. Электротехнический справочник. В 3 т. Т. 3: В 2 кн. Кн. 2. Использование электрической энергии/ Под общ. ред. И.Н. Орлова (гл. ред.) и др. – 7-е изд., испр. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 616 с. (Раздел 52).

9. Михайлов О.П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1990. – 304с.

10. Фотиев М.М. Электропривод и электрооборудование металлургических цехов: Учебник для вузов. - 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990. – 352 с.

11. Автоматизированный электропривод промышленных установок / Под ред. Г.Б. Онищенко. – М.: РАСХН- 2001.-520с.

12. Труды 5 Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии и электроматериаловедение», МКЭЭЭ – 2003 (ICEEE - 2003), Часть 1. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 830 с. (с. 694 – 811. Секция 4. Электрические приводы и системы).

13. Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 373. с.

14. Шенфельд Р., Хабигер Э. Автоматизированные электроприводы: пер. с нем. / под ред. Ю. А. Борцова. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 464 с.

15. Терехов В. М. Системы управления электроприводов: учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. М. Терехов, О. И. Осипов; под ред. В. М. Терехова. – М.: Издательский центр "Академия", 2005. – 304 с.

16. Браславский И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод: Учеб. пособие для студ. учеб. заведений / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков; Под ред. И.Я. Браславского. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 256 с.

17. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: Учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г.Г. Соколовский. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 272 с.

18. Шрейнер Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.

19. Мощинский Ю.А., Беспалов В.Я., Кирякин А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным // Электричество. – 1998. – № 4. – С. 38–42.

20. Удут Л.С. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод: учебное пособие / Л.С. Удут, О.П. Мальцева, Н.В. Кояин; Томский политехнический университет. – 2-е изд., перераб. и доп. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 648 с.

21. Дементьев Ю.Н. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод типовых производственных механизмов: учебное пособие / Ю.Н. Дементьев, В.М. Завьялов, Н.В. Кояин, Л.С. Удут; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2017. – 404 с.

22. Удут Л.С. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 7. Теория оптимизации непрерывных многоконтурных систем управления электроприводов: учебное пособие / Л.С. Удут, О.П. Мальцева, Н.В. Кояин; Томский политехнический университет. – 2-е изд., перераб. и доп. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 220 с.

23. Дементьев Ю.Н. Электрический привод: учебное пособие / Ю.Н. Дементьев, А.Ю. Чернышев, И.А. Чернышев; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 224 с.

24. Мальцева О.П., Удут Л.С., Кояин Н.В., Системы управления электроприводов: Учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – 152 с.

25. Удут Л. С., Мальцева О. П., Кояин Н. В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Часть 1. Введение в технику регулирования линейных систем. Часть 2. Оптимизация контура регулирования: учебное пособие. – Изд. 2-е, перераб. и дополн. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 156 с.

26. Удут Л. С., Кояин Н. В., Мальцева О. П. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 6. Механическая система электропривода постоянного тока: учебное пособие. – Изд. 2-е, перераб. и доп.– Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 148 с.

27. Черных И. В. Моделирование электрических устройств в *MATLAB*, *SimPowerSystems* и *Simulink* – СПб. ; М. : Питер : ДМК Пресс, 2008. — 288 с.

28. Герман-Галкин С .Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в *Matlab* 6.0: учебное пособие. – СПб.: «КОРОНА Принт», 2001. – 320 с.

29. Герман-Галкин С. Г. *Matlab & Simulink*. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.

30. Яура А.Г., Певзнер Е.М. Крановый электропривод: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 344 с.

31. Алиев И. И. Электротехнический справочник. — М.: ИП РадиоСофт, 2000. – 384 с.

32. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.

33. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. /Под общ. ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова. Т.1. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.

34. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами / Под ред. В.И. Круповича, Ю.Г. Барыбина, М.Л. Самовера – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 416 с.

35. Справочник по наладке электрооборудования промышленных предприятий/ Под ред. М.Г. Зименкова, Г.В. Розенберга, Е.М. Феськова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 480 с.

36. Справочник по автоматизированному электроприводу. / Под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского.- М.: Энергоатомиздат, 1983.- 616с.

37. ГОСТ 25778-83. Электроприводы подачи постоянного тока металлорежущих станков с числовым программным управлением. Общие технические требования. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 12 с.

38. ГОСТ 25777-83. Электроприводы главного движения постоянного тока для металлорежущих станков с числовым программным управлением. Общие технические требования. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 12 с.

39.

Публикации студента Л.С.:

Индексируемые в базе Scopus:
(<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=53165090400>):

1. Control system with sinusoidal PWM three-phase inverter with a frequency scalar control of induction motor; 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 - Proceedings

2. Shut-Off Valves of Electric Drive with Thyristor Voltage Regulators and Software Implementation of the Indirect Determination of Moment; 2016 MATEC Web of Conferences

3. Limiting static and dynamic characteristics of an induction motor under frequency vector control; 2017 Acta Polytechnica Hungarica

Интернетресурсы:

1. Каталоги асинхронных электродвигателей общего назначения серий LG (Siemens), АИР, RA и AB (РФ).

2. Каталоги преобразователей частоты фирм Danfoss, Siemens, КЕВ.

3. Калачев Ю.Н. Векторное регулирование (заметки практика).

4. Калачев Ю.Н. Наблюдатели состояния в векторном электроприводе. Москва, 2015 г.

Приложение А

Содержит электронный носитель с библиотекой разработанных базовых цифровых моделей асинхронного регулируемого электропривода с частотным векторным управлением в среде *MATLAB* + *Simulink* версия *MATLAB 7.11 (R2010b)*:

1. **REP_AD_Baza_1_3_1000** – модель однозонного асинхронного электропривода с двигателем мощностью 3 кВт и номинальной скоростью вращения 1000 об/мин, частотным векторным управлением с датчиками тока, скорости и наблюдателем потока двигателя на базе модели ротора двухфазного двигателя в неподвижной системе координат;

2. **REP_AD_Baza_1_30_1500** – модель однозонного асинхронного электропривода с двигателем мощностью 30 кВт и номинальной скоростью вращения 1500 об/мин, частотным векторным управлением с датчиками тока, скорости и наблюдателем потока двигателя на базе модели ротора двухфазного двигателя в неподвижной системе координат;

3. **REP_AD_Baza_dvz_30_1500** – модель двухзонного асинхронного электропривода с двигателем мощностью 30 кВт и номинальной скоростью вращения 1500 об/мин, частотным векторным управлением с датчиками тока, скорости и наблюдателем потока двигателя на базе модели ротора двухфазного двигателя в неподвижной системе координат;

4. **REP_AD_Baza_bdc_3_1000** – модель бездатчикового асинхронного электропривода с двигателем мощностью 3 кВт и номинальной скоростью вращения 1000 об/мин, частотным векторным управлением с датчиками тока и адаптивным наблюдателем скорости двигателя;

5. **REP_AD_Baza_bdc_30_1500** – модель бездатчикового асинхронного электропривода с двигателем мощностью 30 кВт и номинальной скоростью вращения 1500 об/мин, частотным векторным управлением с датчиками тока и адаптивным наблюдателем скорости двигателя.

Приложение Б

Раздел 2

Functional Diagram of a General Purpose Asynchronous Electric Drive with Frequency Vector Control and a Speed Sensor

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ71	Удуд Леонид Степанович		

Консультант школы ИШЭ отделения (НОЦ) ОЭЭ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чернышев Александр Юрьевич	К.Т.Н.		

Консультант – лингвист отделения (НОЦ) ОИЯ школы ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Обсков Александр Владимирович	К.П.Н.		

Functional diagram of a general purpose asynchronous electric drive with frequency vector control and a speed sensor

The AC drive uses three-phase asynchronous squirrel-cage electric motors and three-phase frequency converters with a DC link and a voltage inverter. To implement an asynchronous motor drive control system uses frequency vector control block diagram of the induction motor in a rotating two-phase coordinate system, d, q, oriented by the vector resultant of the rotor flux $\Psi_{2d} = |\Psi_2|$ (Figure 2.1). This model of a two-phase asynchronous motor allows operating not with sinusoidal form, but with constant values of currents, voltages and flux couplings, the values of which are equal to the amplitude values of sinusoidal currents, voltages and flux couplings in a fixed coordinate system.

If internal cross-links in the block diagram of Figure 2.1 are not taken into account or later compensated, the block diagram of the motor in a rotating two-phase coordinate system d, q is simplified (Figure 2.2) and turns out to be similar to a DC motor with independent excitation winding and very convenient for the control system asynchronous motor coordinates. In this case, the electric motor as a control object has two control actions U_{1d} , U_{1q} , and five adjustable motor coordinates: phase currents I_{1d} , I_{1q} and the flux coupling of the rotor Ψ_{2d} of a two-phase motor, electromagnetic torque M and angular velocity ω of a three-phase motor.

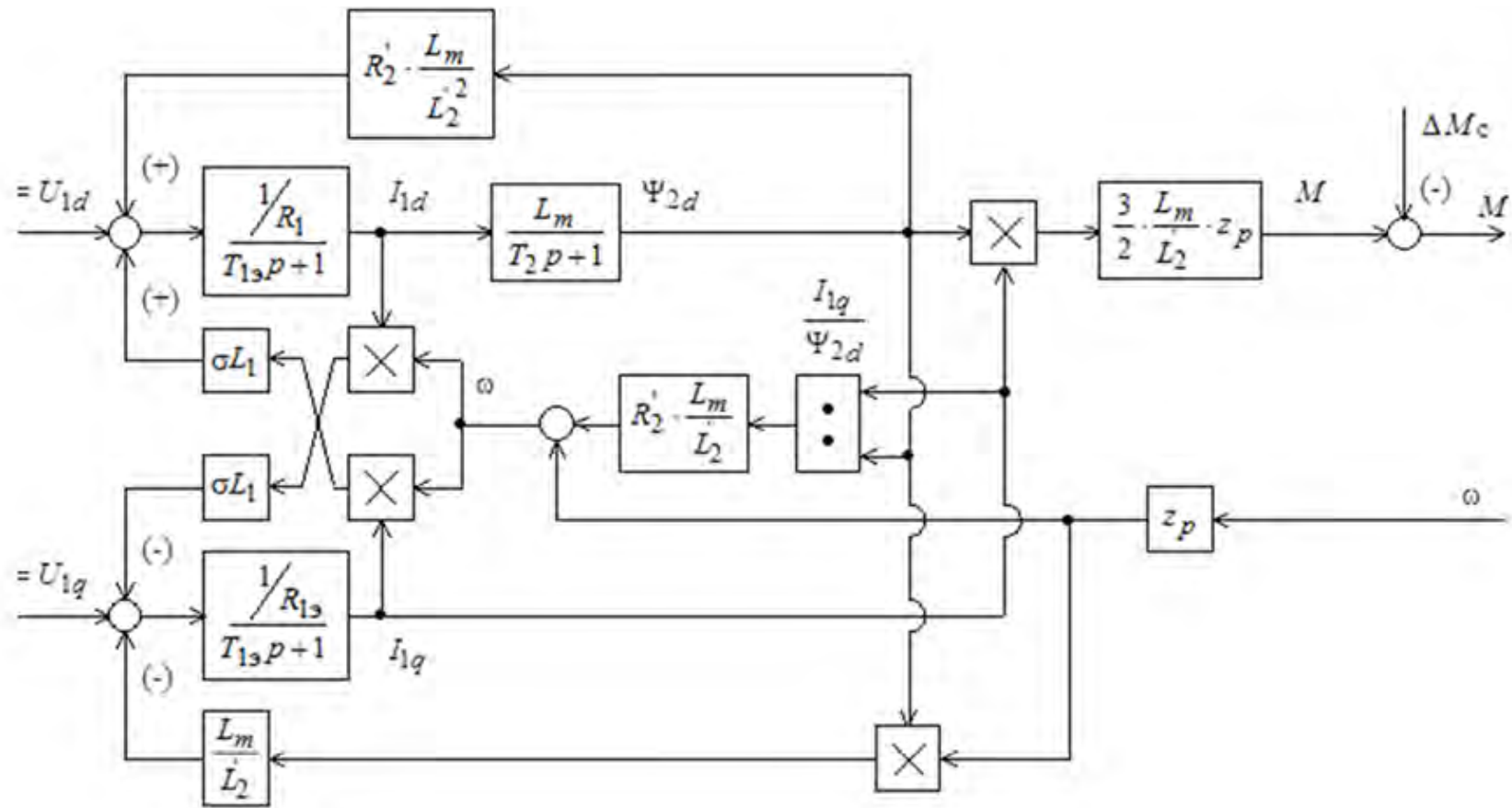


Figure 2.1 - The complete structural diagram of an asynchronous motor with a short-circuited rotor in a rotating coordinate system d, q

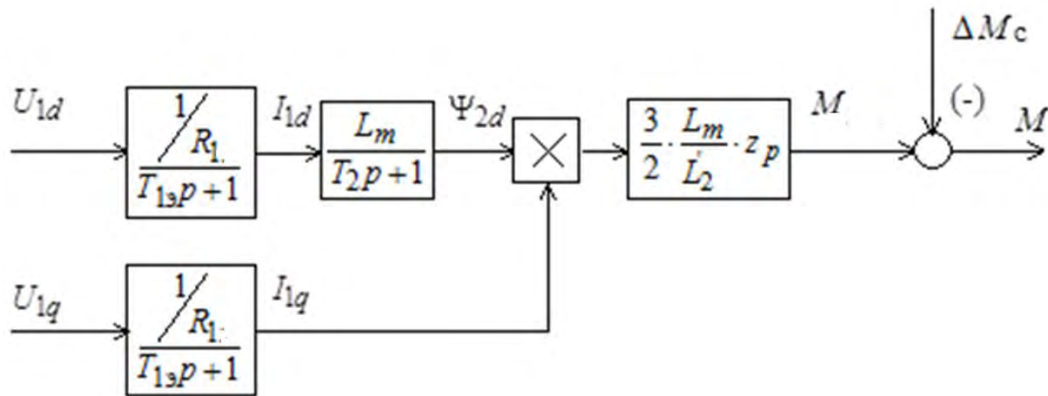


Figure 2.2 - a block diagram of the motor with compensated internal feedback

A simplified diagram of a frequency converter with a DC link and a voltage inverter is shown in Figure 2.3. The LC filter provides smoothing of voltage ripples from the rectifier output. Capacitor C and reverse diodes provide the exchange of reactive energy between the motor and the DC link. The simplest and most economical converter circuit with an unmanaged rectifier is most often used UZ1. The voltage at the output of the inverter, in this case, can only be regulated by pulse-width control in the inverter. Energy recovery in the grid in such a converter is fundamentally impossible. Brake key controlled as capacitor voltage value C. When the voltage on the capacitor C exceeds the maximum allowable level, the key opens and the capacitor discharges to the brake resistor R_T . Excess energy is dissipated as heat. Such a solution is sufficient for electric drives with rare start-ups, as well as for electric drives controlled by speed intensity control units when the motors are braked without energy return. In electric drives of mechanisms with active load (for example, lifting winches, transport mechanisms operating on a descent, etc.) it is desirable to provide energy recovery to the grid. For the implementation of energy return to the grid, the frequency converter with a straight rectifier must additionally be equipped with a

recovery unit. The recovery unit is a controlled rectifier that, in motor's braking mode, acts like an inverter driven by a grid.

The main advantages of the frequency converter with voltage inverter:

- almost sinusoidal load current;
- wide range of output frequencies (almost from 0 Hz to 1000 Hz);

Disadvantages of the frequency converter with voltage inverter:

- large required values of the filter capacity C ;
- the difficulty of providing energy recovery into the grid.

Frequency converters with voltage inverter, designed for electric drives, provide frequency control in the range from 0 Hz to $2 \cdot f_{1H}$ Hz and overcurrent $(1.5 \div 1.6) \cdot I_{IH}$.

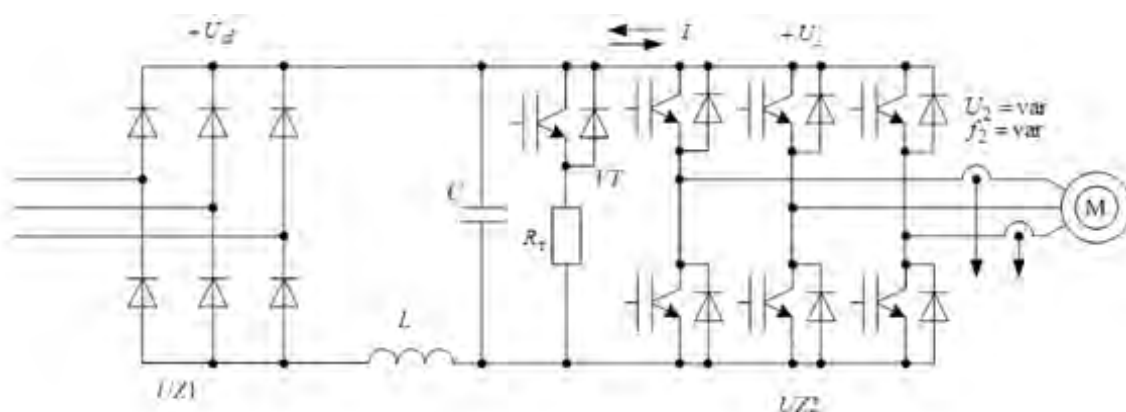


Figure 2.3 - Frequency converter with DC link and voltage inverter

The automatic control system of the electric drive is implemented in accordance with the block diagram of the motor of Figure 2.2 in a multi-circuit structure with a slave coordinate control, contains a dual-circuit automatic flow control system (flow automatic control system (ACS)) and a dual-circuit automatic speed control system (speed ACS) of the motor. Four control loops: currents I_{1d} , I_{1q} (electromagnetic moment $M_{\varphi M}$) and rotor flux

linkage Ψ_{2d} of a two-phase motor and motor rotation speeds $\omega_{\text{дв}}$ have individual PI controllers. Formed by regulators of two-phase motor control current in a rotating coordinate system d, q (Figure 2.2) are sequentially converted into two-phase motor controls in a fixed coordinate system α, β (Figure 2.5), and then a three-phase inverter feeding a three-phase asynchronous motor.

The inverter control system is a three-phase sinusoidal or vector PWM with the introduction of the control of the third harmonic. The correction of the control signals by the inverter depending on the voltage of the DC link is carried out by the circuit U_d -corrector. The speed control is carried out from the speed intensity setter (SIS) installed at the input of the drive control system. In an electric drive system, an asynchronous motor and a mechanical system as a control object are a continuous system, the frequency converter is a discrete device with a control period T_{pwm} , but the drive control system is digital.

In the digital control system of the electric drive, the calculation of the controls is carried out with time quantization, coordinates are measured with time and level quantization. Measurement of currents, speeds, measurement or calculation of the rotor flux linkage is carried out for the time interval of quantization in the feedback circuit T_{oc} , and the calculation of controls - for the quantization time interval in the forward channel of the loop, the inverter's transducer is controlled with a delay for the time interval.

Quantization by level when measuring the currents of two phases and flows in the motor's gap along axes α and β is determined by the ADC's digit capacity of analog sensors, and when measuring speed — the ADC's capacity of an analog speed sensor or the number of pulses per revolution of the angular displacement sensor $n_{im.fs}$

The drive basically allows you to provide:

- the use of large practical experience in the use of multi-loop structures with slave coordinate regulation in control systems of DC electric drives;
- typical adjustment of control circuits with individual PI-regulators of currents I_{1d} и I_{1q} , rotor flux linkage Ψ_{2d} and motor rotation speed ω_{dB} and ensure regulation of controlled coordinates of the electric drive with technically optimal quality indicators;
- motor operation in four quadrants in starting and braking modes and in continuous operation with variable static load moment of a reactive and active nature;
- limiting the adjustable coordinates of the electric drive at the level of their allowable values (maximum current of the converter or motor, the torque of motor rotation, speed of motor rotation, dynamic torque, acceleration and jerk (flick) in transient operating conditions;
- smooth speed control and wide limits;

- organization of two-zone speed control with a constant value of the attenuated flow or with a function of the speed-controlled attenuation of the flow in the second control zone;
- implementation of automated electric drive systems operating in the modes of the moment, position and tracking electric drive;
- work with analogue flow sensors of the engine and without them;
- operation with an analogue speed sensor and a pulse displacement sensor as a speed sensor;
- in the operation mode of rare starts and stops, the discharge of kinetic and potential energy stored respectively in moving or raised masses into the braking resistor;
- in the intermittent mode of operation and in the braking mode of operation with the active moment of the load, the possibility of applying an additional unit of energy recovery to the network.

Reference parameters of the asynchronous motor and frequency converter are in [21, 32 - 34] and in the Internet resources, equivalent circuits and structural diagrams of the motor are calculated according to the method described in [20, 21, 23] using the REP_AD_RL2 program. The parameters of the structural diagrams of an asynchronous motor with a short-circuited rotor in a rotating coordinate system d, q (Figure 2.1) and in a fixed coordinate system (Figure 2.4) are used when calculating control system settings and implementing a flow observer. In these cases, the parameters of the models should take into account the resistance of the connecting wires of the motor, R_w . Diagram of the basic simulation model of an asynchronous electric drive with frequency vector control is shown in figure 2.6

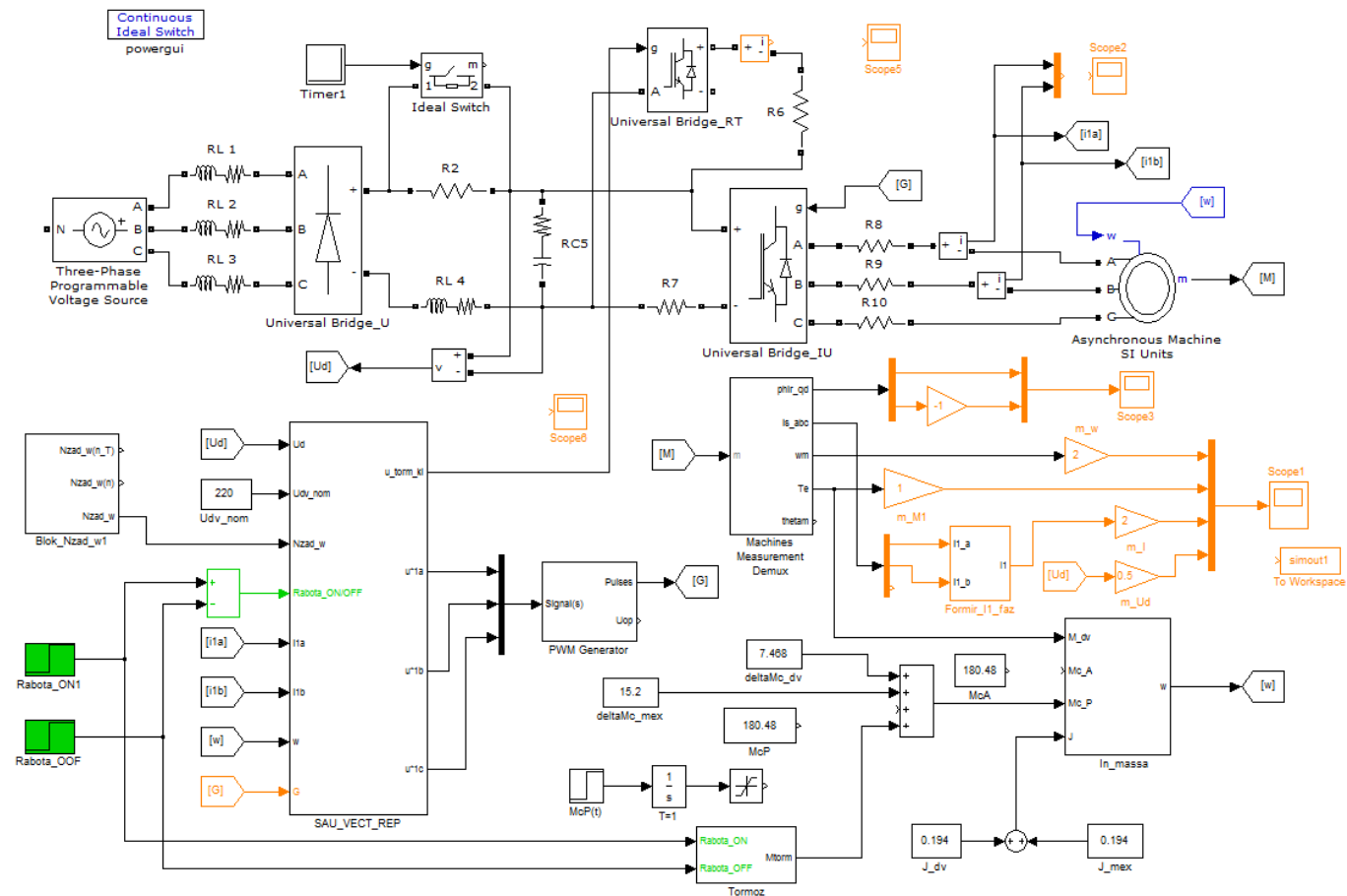


Figure 2.5 - Diagram of the basic simulation model of an asynchronous electric drive with a frequency vector control system

Two-zone asynchronous electric drive with frequency vector control

To implement the model of a two-zone electric drive with frequency vector control, a structure with a speed sensor and a simple motor flow monitor has been chosen. The implementation of the motor flow control unit and its setting are made in accordance with [21, Section 5.2.5]. The parameters of the motor, converter, power channel and electric drive control system with a RA200L4 motor are given in Section 9. In the study of two-zone electric drive the following parameters of the electric drive are taken: $M_{sR\max} = M_{sA\max} = 180 \text{ N} \cdot \text{m}$; $J_{\text{mech}} = J_m = 0.194 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; $\omega_{a.\max} = \omega_{d.\max} = 150 \text{ rad/s}$. The settings of the setpoint intensity with an S-shaped output characteristic: $T_{k.zi} = 0.002$, $t_1 + t_2 + t_3 = 1.6 \text{ c}$, $t_1 = t_3 = 0.4 \text{ c}$, $t_2 = 0.8 \text{ c}$, $\frac{T_{i1}}{T_{k.zi}} = 200$, $\frac{T_{i2}}{T_{k.zi}} = 600$ $k = 0.5/3$.

Model is shown on CD – REP_AD_Baza_dvz_30_1500.

The purpose of research:

1. Check the principle of motor flow control and the method for selecting parameters of a two-zone electric drive control device proposed in [21, Section 5.2.5].

Selection of parameters of the rotor flux-linkage

The basis of the rotor flux linkage shaper of a two-zone electric drive is based on the structural diagram given in [21, Figure 74]. The driver circuit is shown in Figure 12.1. When specifying the characteristics of a functional converter $\omega^*(M^*)$, the family of mechanical characteristics of an electric drive with an open-loop speed circuit (Figure 9.16) obtained in Section 9 was used, corresponding to the main voltage $U_{n\max} = 418 \text{ V}$, $U_{nn} = 380 \text{ V}$ and $U_{n\min} = 418 \text{ V}$.

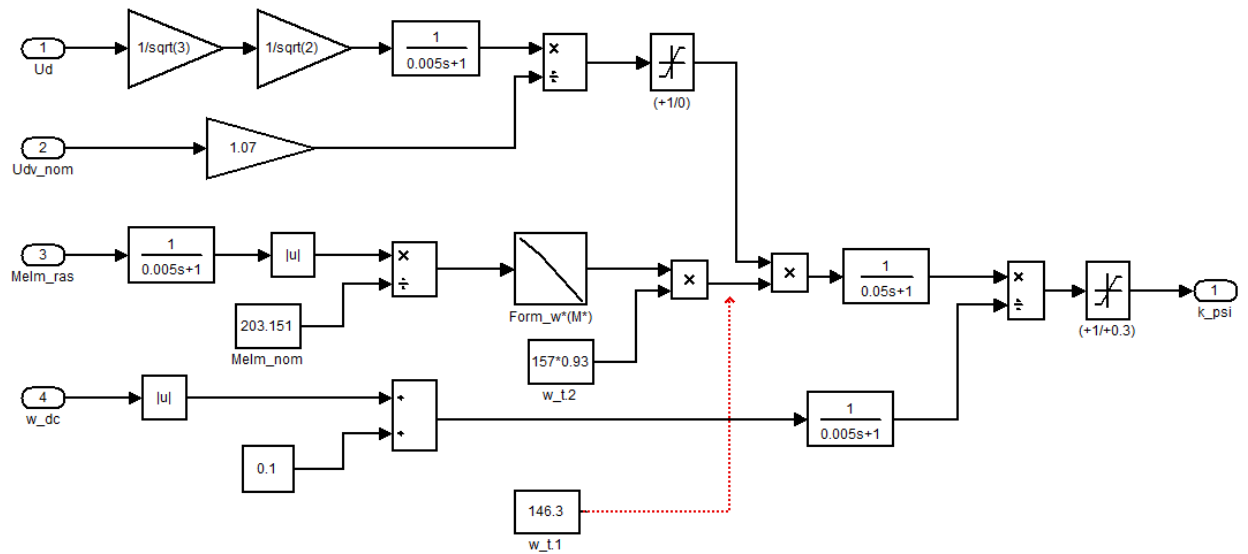
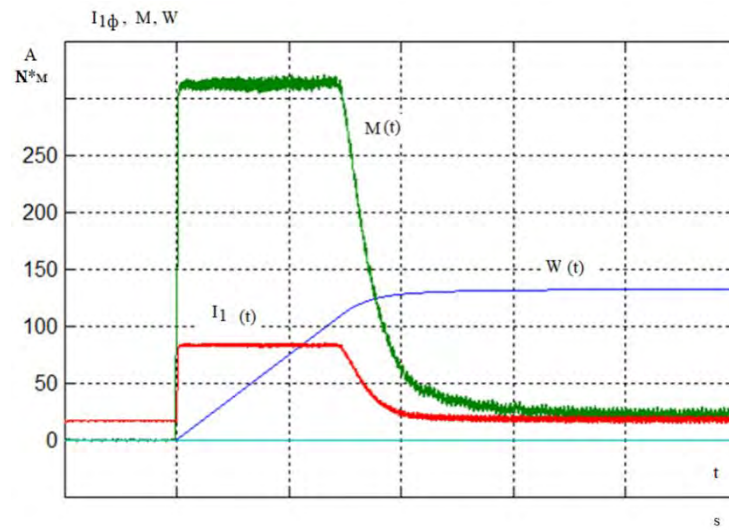


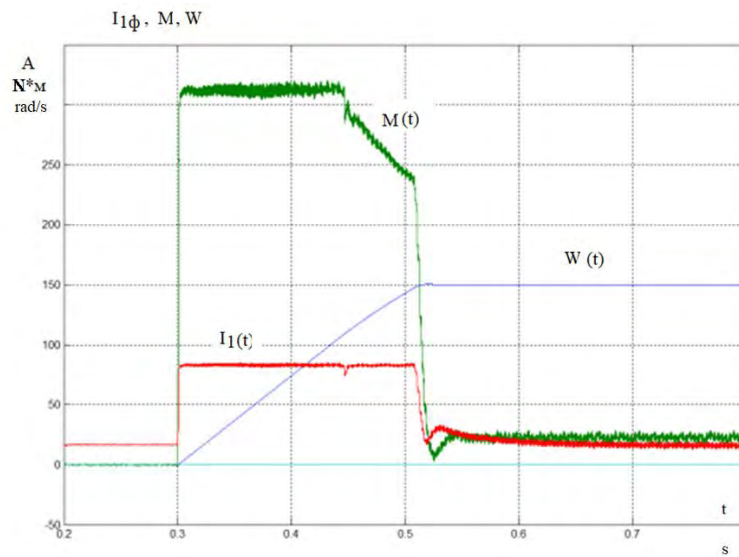
Figure 12.1 - Diagram of the rotor flux linkage driver

Electric drive research based on the simulation model

The simulation model is configured in full accordance with the calculated parameters. Figures 12.2 - 12.8 show diagrams of current, electromagnetic momentum, speed, setpoint and actual values of the rotor and two-phase motor flux linkages, illustrating how the motor drives the speed value. Figures 12.2 - 12.8 show diagrams of current, electromagnetic momentum, speed, setpoint and actual values of the rotor flux linkage and a two-phase motor, illustrating the speed adjustment at $U = 323\text{V}$. The coordinate charts in Figures 12.2 - 12.6 are obtained with an analog speed sensor and a reactive load.

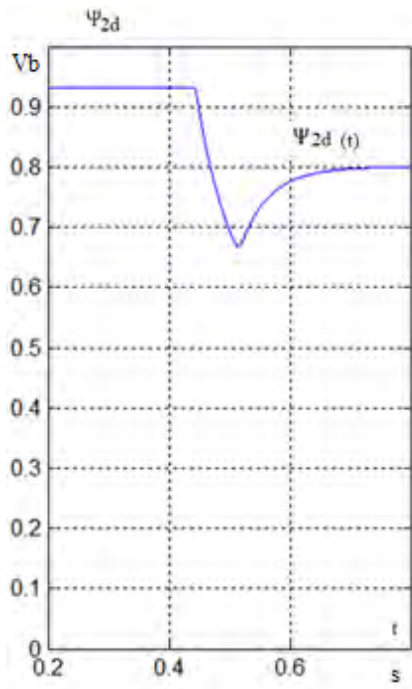


a

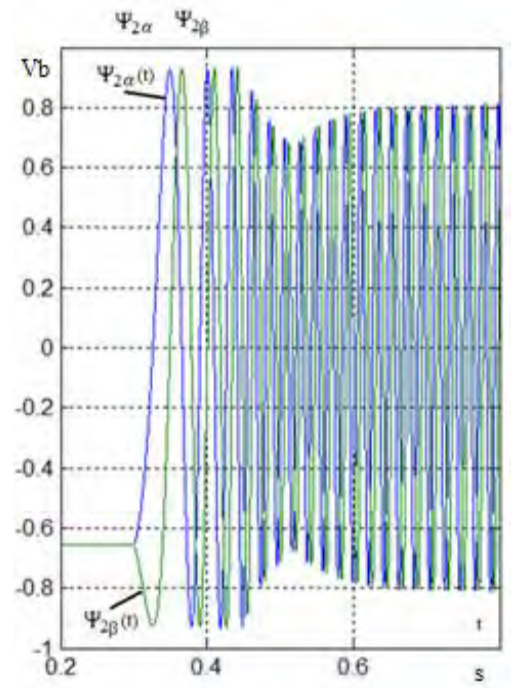


b

Figure 12.2 – The drive operation with step task at idle running: a - single-zone, b - two-zone



a



b

Figure 12.3 – Testing the drive operation with step task at idle running ($\omega = 150 \text{ rad/s}$): *a* – calculated dependence $\Psi_{2d}(t)$; *b* – actual flow link diagrams $\Psi_{2\alpha}(t)$ and $\Psi_{2\beta}(t)$

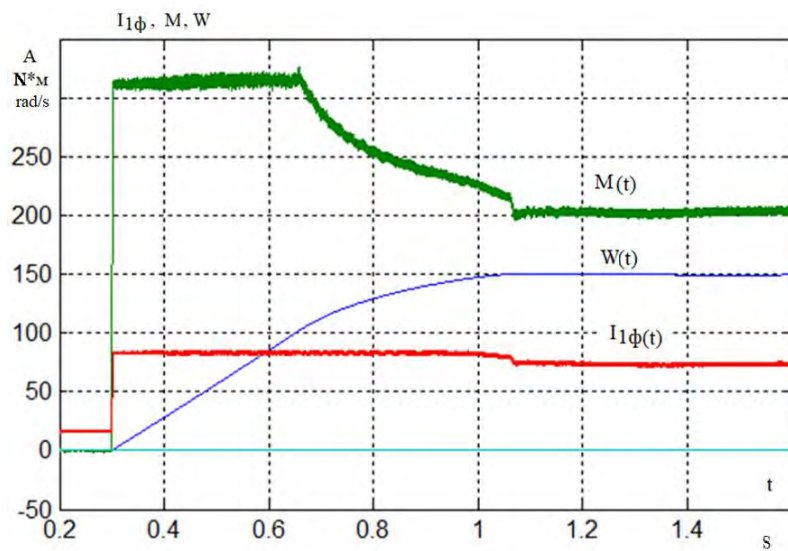


Figure 12.4 – Testing a two-zone motor with step speed setting $\omega = 150 \text{ rad/s}$ and load moment $M_{sR} = M_{m.n}$

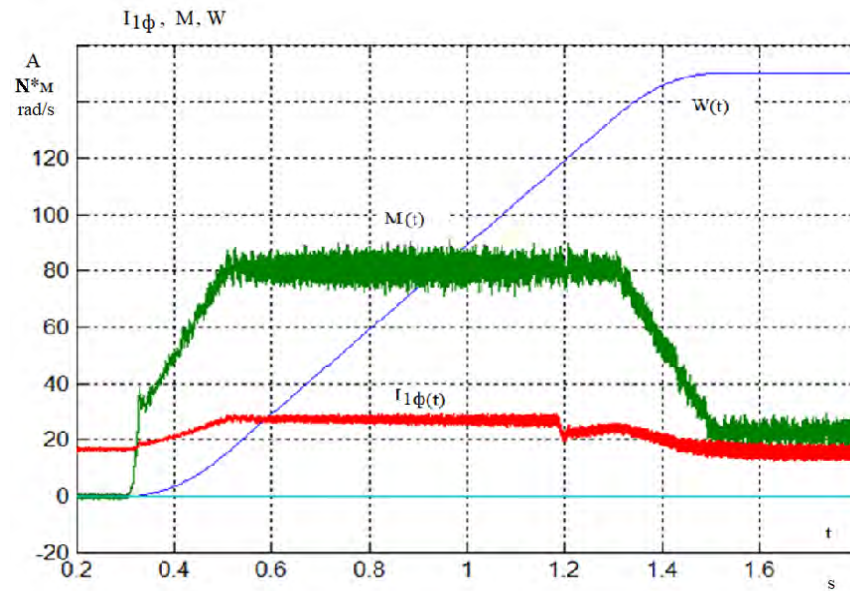


Figure 12.5 – Testing a two-zone electric drive at idle running with control from the speed intensity setting unit

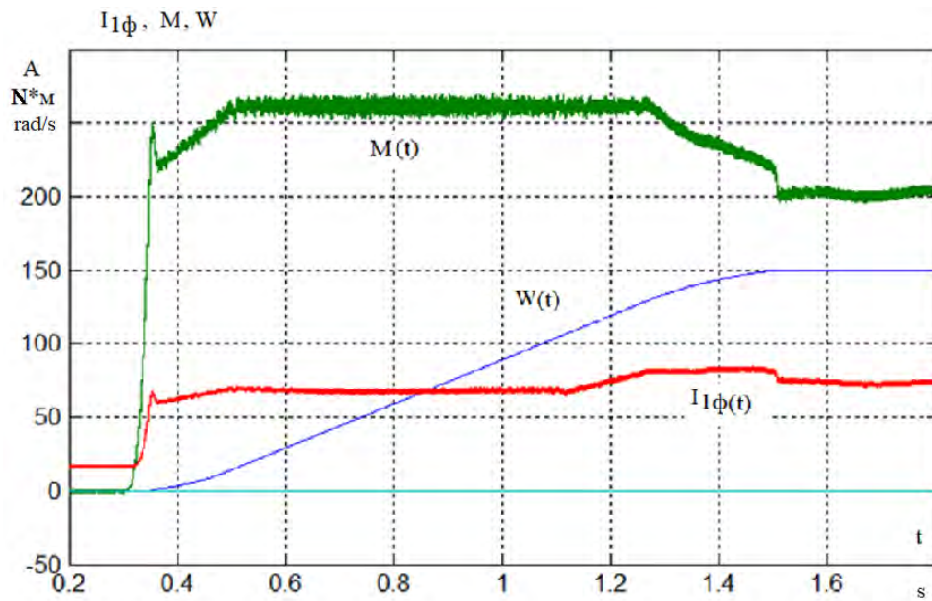


Figure 12.6 – Testing a two-zone electric drive with the moment load task $M_{SR} = M_{m.n}$ and with control from the speed intensity setting unit

Figures 12.7 - 12.8 show diagrams of current, torque and motor speed, as well as DC link voltages, $U_d(t)$, taken with a pulse speed sensor, active load, control from the speed intensity adjuster.

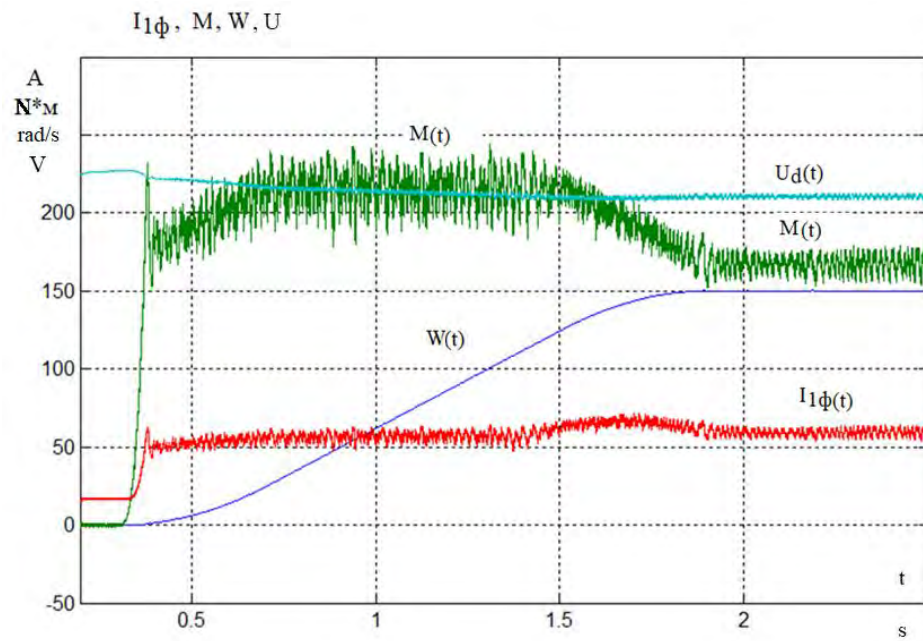


Figure 12.7 - Testing a two-zone electric drive with a pulse sensor and the torque $M_{SA} = 0.8 \cdot M_{m.n}$ settings $\omega = 150 \text{ rad/s}$

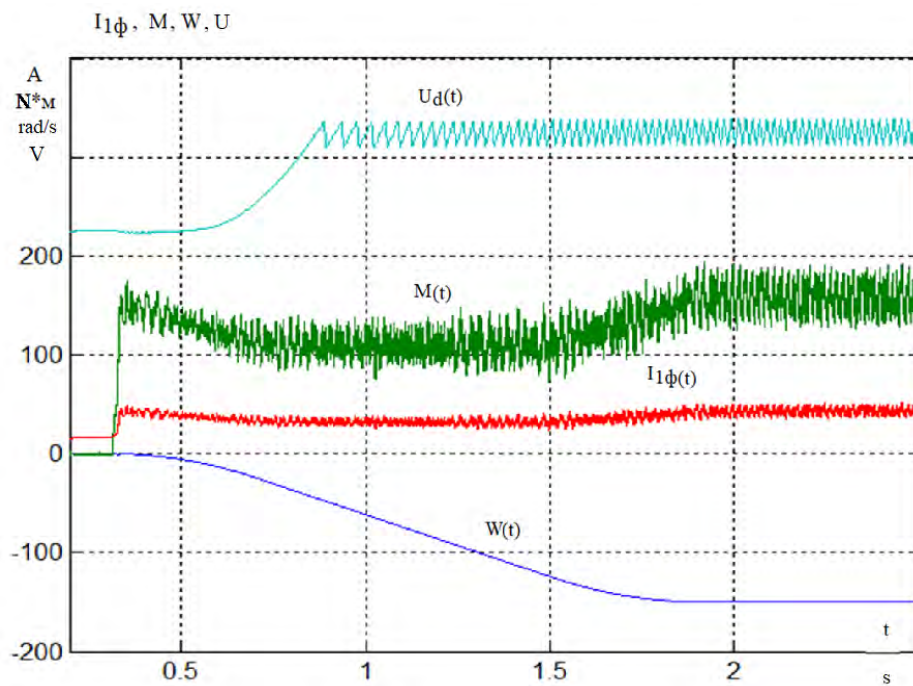


Figure 12.8 - Testing a two-zone electric drive with a pulse sensor and the torque $M_{SA} = M_{m.n}$ settings $\omega = 150 \text{ rad/s}$

Conclusion

1. The simulation model of a two-zone electric drive is operational, the proposed method allows to calculate the parameters and adjust the flow control unit of the motor of the ACS (automatic control system) of the electric drive.

2. Studies confirm the effectiveness of the proposed method of implementing two-zone motor speed control, which increases with increasing voltage interval of the supply grid.